Über die Wärmetönung von Zementen und damit zusammenhängende Fragen

Von der

Technischen Hochschule zu Breslau

zur

Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs

genehmigte

Dissertation

Vorgelegt von

Dipl.-Ing. Walter Benedickt
aus Neumarkt/Schl.

Berichterstatter:
Prof. U. Fischer

Mitberichterstatter:
Prof. Dr. rer. techn. Suhrmann

Tag der mündlichen Prüfung: 25. 1. 1938

1938

Druckerei u. Verlag wissenschaftlicher Werke Konrad Triltsch Würzburg

*41438

R. UNIV.
BIBLIOTHEEK
LEIDEN

Meinen lieben Eltern!

VORWORT.

Die vorliegende Arbeit wurde im wesentlichen in der Zeit vom Mai 1934 bis April 1936 angefertigt. Alle Versuche wurden in dieser Zeit im Betonlaboratorium der T. H. Breslau angestellt. Die erste vorläufige Zusammenstellung der Arbeit erfolgte im März—April 1936, die jetzt vorliegende Fassung erhielt die Arbeit im wesentlichen Anfang 1937. Die bis September 1937 erschienen Literatur ist noch berücksichtigt.

Dem damaligen Leiter des Betonlaboratoriums, Herrn Prof. Dr. Ing. Alfred B e r r e r, bin ich für die Anregung zu dieser Arbeit und die mannigfache Unterstützung während der Untersuchungen zu aufrichtigem Dank verpflichtet.

INHALTSVERZEICHNIS.

Einleitung 1

A. Bestimmung der Wärmetönung von Zementen 2

I. Verfahren zur Bestimmung der Wärmetönung 2

1. Die indirekte Methode 2

2. Die direkte Methode 3

II. Erste Kritik der genannten Verfahren 7

III. Eigene Versuche 12

1. Aufzählung und Beschreibung 12

2. Bericht über die durchgeführten Versuche 18

3. Zusammenstellung der Ergebnisse des Teiles A. 28

IV. Wege zur Vorherbestimmung der zu erwartenden Höchsttemperatur im Massenbauwerk 32

B. Verlauf der Wärmetönungskurve eines Zementes und seine Beziehungen zu den Abbindeverhältnissen des Zementes 34

I. Einwände gegen den Vicat-Versuch und neue Vorschläge zur Festlegung der Abbindeverhältnisse 34

II. Eigene Versuche zur Klärung des Zusammenhanges zwischen Wärmetönungskurve und Abbindeverhältnissen 37

1. Bericht über die durchgeführten Versuche 37

2. Ergebnis der Versuche 41

III. Kritische Betrachtung über die Frage der Abbindezeiten überhaupt 43

Ergebnis der vorliegenden Arbeit 45

EINLEITUNG.

Die Wärmetönung bei Zementen wird bislang auf den verschiedensten Wegen bestimmt, ohne daß festgestellt werden kann, welchem Verfahren bei Bestimmung der Wärmetönung der Vorrang einzuräumen ist. Ziel der vorliegenden Arbeit soll deshalb sein, aus der bislang bestehenden Literatur durch kritische Betrachtung und durch neue eigene Versuche eine Methode bei der Bestimmung der Wärmetönung aufzuzeigen, welche einfach und für den praktischen Fall genügend genau ist.

Ferner gibt es Stimmen, die den „Vicat-Versuch" wegen zu schwankender Ergebnisse bei der Bestimmung der Abbindezeiten von Zementen ablehnen und unter anderem auch die Wärmetönungskurve als ein zur Bestimmung der Abbindezeiten von Zementen brauchbares Mittel bezeichnen. Es soll deshalb im folgenden auch die Frage geprüft werden, ob durch eigene Versuche ein Weg zur Benutzung der Wärmetönungskurve bei Bestimmung der Abbindezeiten aufgezeigt werden kann; in der Literatur fehlt es zwar nicht an Hinweisen auf diesen Weg, jedoch sind die Angaben zu allgemeiner Natur, als daß dadurch eine Zuverlässigkeit dieser Methode bei Festlegung der Abbindezeiten gesichert erscheint.

Der hier zu bearbeitende Stoff zerfällt sonach in zwei Teile:

1. Es sind die Möglichkeiten zur Bestimmung der Wärmetönung aufzuzeigen und zu prüfen.
2. Es sind die Beziehungen festzustellen, die zwischen dem zeitlichen Verlauf der Wärmeentwicklung und den Abbindezeiten bestehen.

In der vorliegenden Arbeit soll versucht werden, alle bisherigen Quellen die obigen beiden Fragen betreffend, zu nennen. Desgleichen werden alle eigenen Versuche kurz erwähnt, auch wenn sie nicht zum gewünschten Ziele führten. Dies geschieht deshalb, weil bislang eine größere Zusammenfassung aller Anstrengungen auf dem hier zu bearbeitenden Gebiet fehlt, und diese trotzdem wegen der Grundsätzlichkeit der zur Diskussion stehenden Fragen angezeigt erscheint.

Teil A.

BESTIMMUNG DER WÄRMETÖNUNG VON ZEMENTEN.

I. Verfahren zur Bestimmung der Wärmetönung.

Zur Messung der Wärmetönung von Zementen bestehen zwei grundsätzlich verschiedene Wege: der indirekte und der direkte Weg.

1. Die indirekte Methode zur Bestimmung der Abbindewärme.

Der Weg ist vorgezeigt durch die Arbeiten von Woods, Steinour und Starke[1]). Sie lösen einmal trockenes Zementpulver und ein anderes Mal die gleiche Menge von demselben Zement, der eine bestimmte Zeit bei bestimmter Temperatur hydratisiert ist, in einer Säure auf und stellen aus der Differenz der Lösungswärmen der beiden Proben die Abbindewärme fest, welche vom abbindenden Zement bis zum Zeitpunkt des Endes der gewählten Hydratisierung überhaupt frei wird. Dabei ist zu beachten, daß das Gewicht des hydratisierten Zementes auf das Gewicht des trockenen, unveränderten Zementpulvers bezogen ist, d. h. es werden zwei gleiche Mengen unveränderten Zementes genommen, die eine Probe wird sofort geprüft, die andere nach der oben beschriebenen Behandlung. Dieser Versuch geht für einen Zement, der unter immer den gleichen Verhältnissen aber verschieden lange hydratisiert wurde, durchzuführen. Dadurch ist es möglich, für den betrachteten Zement die Gesamtabbindewärme für die einzelnen Zeitabschnitte des Abbindeprozesses zu bestimmen. Ebenso ist es möglich, den Beitrag zur Abbindewärme des Zementes für seine einzelnen Bestandteile zu ermitteln und auf Grund der bekannten Zusammensetzung des Zementes die Abbindewärme rechnerisch zu ermitteln.

[1]) Eng. News Record, 1932, Vol. 109, S. 404 und 435.

Von Lerch[2]) wird für die indirekte Methode der Lösungswärme einige Zeit nach der Aufzeichnung dieses Weges ein einfaches Kalorimeter für die Bestimmung der Lösungswärme entwickelt. Die in Deutschland gebauten Geräte gehen im Prinzip auf das von Tamman im Jahre 1903 entwickelte Kalorimeter zurück. Berichte über die Entwicklung dieser Geräte sind in der Literatur enthalten[3]).

2. Die direkte Methode zur Bestimmung der Abbindewärme.

Hierbei wird in reinem Zementbrei oder in Mörtel bzw. Beton die Erwärmung im Laufe des Abbindeprozesses direkt durch Temperaturmessung festgestellt. In der Versuchsanordnung zur Verwirklichung der Bestimmung der Abbindewärme auf direktem Wege sind zwei grundsätzliche Unterschiede zu machen:

a) die adiabatische Versuchsanordnung,
b) die isotherme Versuchsanordnung.

Bei der adiabatischen Methode ist man bestrebt, alle auftretende Wärme durch vollkommene Isolation zu speichern. Dadurch wird die im Lauf des Abbindeprozesses frei werdende Wärme restlos zur Erhöhung der Temperatur des Probekörpers benutzt und ist dadurch meßbar. Die Standard-Apparatur für diesen Versuch ist von Davey[4]) entwickelt.

In dem Apparat steht die Zement- oder Betonprobe in einem Isolierbehälter, welcher seinerseits in einem Wasserbade untergebracht ist. Das Wasserbad wird durch die folgend beschriebene Anordnung automatisch immer auf etwa der Proben-Temperatur gehalten: Besteht zwischen der Temperatur im Innern der Zementprobe und der Temperatur des umgebenden Wasserbades eine Differenz, so entsteht in einem eingebauten Thermoelement ein schwacher Strom. Die auftretende Spannung bewirkt auf einem angelegten Galvanometer einen Ausschlag. An dem Galvanometer ist ein Spiegelchen derart befestigt, daß auf dieses dauernd ein Lichtstrahl von einer geeigneten Lichtquelle fällt. Zeigt bei Temperaturdifferenz das Galvanometer einen Ausschlag, so wirft dann der etwas gedrehte Spiegel den Lichtstrahl auf eine Selen-Zelle, welche ihrer-

[2]) Eng. News Record, 1934, Vol. 113, S. 523.
[3]) Zement, 1935, S. 229.
[4]) Concrete Construction. Eng. 1931, S. 572.

seits durch die Bestrahlung in höherem Maße leitend geworden, über ein Relais und geeignete Verstärkeranordnung durch Schließung eines elektrischen Stromes die Erwärmung des Wasserbades bewirkt, solange bis die Temperaturgleichheit hergestellt ist. Auch die Temperaturaufzeichnung für die Probe erfolgt automatisch. Somit ist ein absolut einwandfrei und ohne jede Wartung arbeitendes Gerät geschaffen, welches jedoch den Nachteil hat, daß es wegen der hohen Anschaffungskosten kaum für einen allgemeinen praktischen Gebrauch in Frage kommt.

Für Baustellen von Beton-Massenbauwerken besteht jedoch das dringende Bedürfnis, den Zement bezüglich seiner Wärmeeigenschaften laufend zu untersuchen. Zu diesem Zweck ist es notwendig, ein möglichst einfach zu handhabendes und wohlfeiles Gerät zu besitzen. Von der Internationalen Talsperren-Kommission als Unterabteilung der Weltkraftkonferenz wurde deshalb eine Arbeitsgruppe für Spezial-Zemente berufen, welche u. a. die Aufgabe erhielt, einen geeigneten Apparat zu schaffen. In diesem Zusammenhang schlug die britische Unterabteilung der Arbeitsgruppe das in der „Building Research Station" von Davey entwickelte einfachere Gerät vor, welches etwa wie folgt arbeitet. (Siehe Abb. 1):

Adiabatisches Kalorimeter
nach Davey (einfachere Bauart)
Schnitt

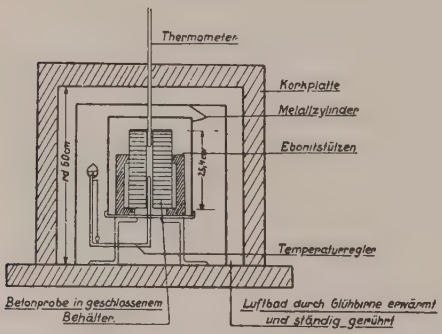


Abb. 1.

Eine Betonprobe, untergebracht in einem Blechgefäß von ca. 25 cm Höhe und 15 cm Durchmesser, oben vollkommen dicht abgeschlossen, steht in einem Ebonit-Rahmen. Über die gesamte Probe ist ein Kupfergefäß gestülpt und diese ganze Apparatur nach

außen hin mit einem weiteren Kupfermantel umgeben. Die Betonprobe ist hochgestellt, so daß der äußere Kupfermantel um die gesamte Apparatur einen Luftraum umschließt. Die äußerste Wandung der Apparatur besteht aus Korkplatten. Diese Ummantelung ist so gewählt, daß noch ein kleiner Ventilator und eine kleine Kohlenfadenlanmpe davor im Innern Platz haben. Durch den eingebauten Quecksilber-Temperatur-Regler wird für den Fall, daß zwischen der Zementprobe und der Luft zwischen beiden Kupfermänteln eine Temperaturdifferenz besteht, die Kohlenfadenlampe eingeschaltet und damit die in dauernder Umwälzung befindliche äußere Luft erwärmt. Einem Sonderdruck [5]) der Building-Research-Station zufolge arbeitet dieses Gerät bis zu einer Versuchsdauer von etwa 7 Tagen annähernd ebenso genau wie die weiter oben beschriebene Standard-Apparatur desselben Institutes.

Im Auftrage der Weltkraftkonferenz arbeitet man an demselben Problem auch in Norwegen. Vogt [6])-Trondheim hat ein Gerät mit geringerer Genauigkeit und nur teilweise automatisch arbeitend entwickelt. (Siehe Abb. 2):

Kalorimeter nach Prof. Vogt
Schnitt

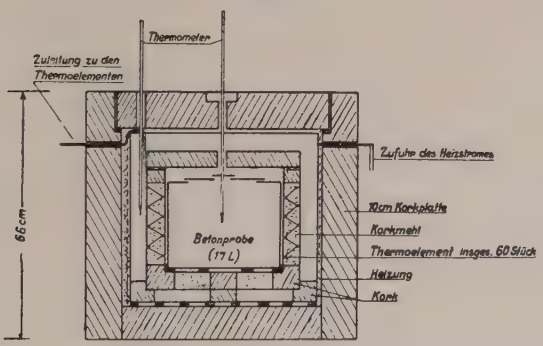


Abb. 2.

In einem Blechgefäß von 17 Ltr. Inhalt ist der zu prüfende Mörtel oder Beton untergebracht. Den Probekörper umgeben, durch einen kleinen Luftspalt getrennt, zwei weitere zylindrische Blech-

[5]) The Structural Engineer, Juli 1935:, von der Building Research Station freundlicherweise zur Verfügung gestellt.

[6]) Berichte und Zeichnungen über die Arbeiten in Trondheim wurden dem Verfasser liebenswürdigerweise zur Verfügung gestellt.

gefäße, deren Innenraum mit Korkmehl aufgefüllt ist. An den Außenflächen dieser Korkmehlschicht sind im ganzen 60 Thermoelemente angebracht, welche jede noch so kleine Temperaturdifferenz zwischen den Wänden anzeigen. Die Apparatur ist nach außen hin mit einer Korkumkleidung versehen, an deren Innenseite eine elektrische Heizung angebracht ist. Bei Ansteigen der Proben-Temperatur wird hiermit das äußere Luftbad erwärmt. Die Temperatur in der Zementprobe und im Luftmantel wird durch Quecksilberthermometer gemessen. Die zu prüfende Masse wird meist als Zement-Normensandgemisch 1 : 3 angerührt oder es wird die bauwerksmäßige Betonmischung untersucht. Nach Angaben von Juli 1935 wird dieses Gerät auch für 6 Liter-Proben gebaut.

Bei der isothermen Versuchsanordnung[7]) ist man bestrebt, die zu untersuchende Probe immer auf der gleichen Temperatur zu halten, indem alle während des Abbindeprozesses freiwerdende Wärme abgeleitet und dabei ihrer Menge nach gemessen wird.

Zwischen der adiabatischen und der isothermen Versuchsanordnung liegen die bislang gebräuchlichsten Isolierbehälter, in denen ein Teil der freiwerdenden Wärmemenge gespeichert wird, ein anderer Teil aber ungemessen abfließt. Ausgeführt werden diese Isolierbehälter meistens als Holzkisten, die in einem eingestellten Blechgefäß die zu untersuchende Probe enthalten und nach außen hin auf die verschiedensten Arten isoliert sind. Die Temperatur der Probe wird mittels Thermometer oder Thermoelement gemessen und womöglich auf elektrischem Wege selbst registriert.

Auch ein solches Gerät wurde von Vogt-Trondheim gebaut und nach seinen Berichten als genügend gleichmäßig und sicher arbeitend bezeichnet. Es besteht wie das oben beschriebene adiabatische Gerät aus einem 17 bzw. 6 Liter-Gefäß zur Aufnahme der Probe; die Isolierung nach außen hin ist vollkommen gleich der beim adiabatischen, nur ohne Thermoelemente und ohne elektrische Heizung. Die Wärmemenge, welche vom Gerät selbst aufgenommen wird und welche nach außen abfließt, wird durch eine an Stelle der Zementprobe eingebaute elektrische Heizung vorher genau ermittelt und für die verschiedenen Temperaturdifferenzen zwischen Innen- und Außen graphisch aufgetragen. In Zwischenräumen von 8 Stunden sollen die Temperaturen abgelesen und auf Grund der für das Gerät bekannten Daten daraus die in diesem Zeitraum ent-

[7]) Zement, 1933, S. 593.

wickelte Wärmemenge errechnet werden. Bemerkenswert ist bei diesem Apparat noch, daß die Zementtemperatur nicht im Innern der Probe, sondern in dem inneren Luftspalt gemessen wird. Zudem wird noch die Temperatur im äußeren Luftmantel festgestellt. Die Temperaturmessung wird mittels Thermometer vorgenommen, deren Einführungsstellen sorgfältig gedichtet sind. Man hat diese Versuchsanordnung als s e m i - i s o t h e r m bezeichnet.

II. Erste Kritik der genannten Verfahren.

Das unter 2b genannte isotherme Verfahren, das den Wärmeabfluß bestimmen soll, ist nicht in größerem Umfang in Brauch gekommen. Wegen der kostspieligen und umständlich zu handhabenden Apparatur dürfte diese Versuchsanordnung m. E. als abgelehnt gelten.

Die bislang üblichsten Methoden mit den Isolierbehältern verschiedenster Bauart sind zu ungenau und vor allem besteht kaum eine Möglichkeit, sie allgemein einheitlich herzustellen, um damit Zemente absolut vergleichen zu können. Alle Eichungsversuche an den unvollkommenen Isolierbehältern durch Bestimmung der Abkühlungskurven, wie sie an einigen Stellen vorgeschlagen werden[8]), sind prinzipiell falsch, wenn man den Versuch nur über verhältnismäßig kurze Zeit erstreckt und die Form der Wärmetönungskurve als Charakteristikum für den untersuchten Zement haben will. Denn zunächst ist festzustellen, daß die chemischen Prozesse beim abbindenden Zement je nach der augenblicklich höheren oder niederen Temperatur schneller oder langsamer vonstatten gehen. Es ist also, verfolgt man das oben genannte Ziel, falsch, eine am unvollkommenen Isolierbehälter aufgenommene Wärmetönungskurve dadurch zu verbessern, indem man sie an den entsprechenden Stellen um die zugehörigen Werte einer Abkühlungskurve erhöht; würde das Gerät vollkommen adiabatisch arbeiten, so wäre die Ordinate der Kurve an der betrachteten Stelle noch größer, nämlich um den Betrag, der bedingt wäre durch die vergrößerte Wärmeentwicklung infolge der durch die größere Wärme bewirkten Beschleunigung der chemischen Prozesse; d. h. also, die Wärmetönungskurve würde noch steiler verlaufen.

[8]) „Die Thyssenzemente 1930."
Chimie et Industrie 1934, S. 1291—1300.

Auch der Versuch, eine Eichung der unvollkommenen Isolierbehälter dadurch vorzunehmen, daß man die Abkühlungskurve an einem in das Gerät eingestellten und erhitzten abgebundenen Probekörper feststellt, ist erstmals schon aus dem oben erwähnten Grund abwegig und zudem ist die spez. Wärme des abbindenden und abgebundenen Mörtels oder Betons verschieden.

Vogt (s. S. 6) wendet trotzdem eine Art Eichung an, welche in seinem Fall wohl angängig ist, weil die Versuche in Trondheim sich über mindestens 2 Wochen erstreckten und in dieser Zeit erfahrungsgemäß der weitaus größte Teil der Abbindewärme freigeworden ist; in Trondheim will man ja auch in dem erwähnten Gerät nicht den zeitlichen Verlauf der Wärmeentwicklung festlegen, sondern man will die Wärmemenge wissen, welche vom abbindenden Zement überhaupt abgegeben werden kann. Jedoch dürfte m. E. eine komplizierte Errechnung der freiwerdenden Wärmemenge noch nicht die Ideallösung sein, und zudem vertritt der Verfasser die Meinung, daß es wichtig ist, nicht nur die überhaupt mögliche Wärmeabgabe des abbindenden Zementes zu kennen, sondern auch deren Geschwindigkeit im Laufe des Abbindeprozesses. Gerade diese Geschwindigkeit ist wichtig zur Berechnung der zu erwartenden Höchsttemperatur im Massenbauwerk; denn nur wenn man die Wärmetönungskurve für den Beton im Massenbauwerk in etwa der Form nach kennt, kann man beurteilen, welcher Teil der Abbindewärme beim Einbringen des Betons durch Witterungseinflüsse usw. abfließen kann, und welcher Teil eine Erhöhung der Temperatur des Bauwerksbetons bedingen wird.

In neuester Zeit schlägt Keller[9]) in einem Aufsatz, in welchem teils ähnliche Gedanken wie oben geäußert werden, vor, die Wärmeverluste beim Aufnehmen der Wärmetönungskurve in einem halbadiabatischen Gerät etwa nach Art der hier beschriebenen Wärmekiste wie folgt zu berücksichtigen: In das Gerät wird der zu untersuchende Zementbrei oder Mörtel eingebracht und die Wärmetönungskurve aufgenommen. Diese hat etwa die Gestalt der Kurve I auf Anl. 4. Um nun die richtige Kurve für die zeitliche Wärmeentwicklung bei dem untersuchten Zement zu erhalten, wird in einem zweiten Versuch von genau derselben Dauer der schon abgebundene Zementbrei- oder Mörtelkörper mit der Anfangstemperatur der Probe im ersten Versuch in das Gerät eingebracht. Durch eine geeignete elektrische Heizung wird nun auf vollkommen

[9]) Beton und Eisen 1937, S. 232 ff. u. 248 ff.

automatischem Wege dem Probekörper die Wärmemenge zugeführt, die notwendig ist, um die Wärmetönungskurve vom ersten Versuch zu erzielen. Die Kurve der zugeführten Wärmemenge im zweiten Versuch hat dann etwa die Form der Kurve IV auf Anl. 12, d. h. sie nähert sich nach etwa 20 Std. Versuchsdauer asymptotisch der Wagerechten.

Abgesehen davon, daß, wie eben schon gesagt, die spez. Wärme vom abbindenden und bereits abgebundenen Beton verschieden sind und das besonders im Bereich nach dem Temperaturmaximum im ersten Versuch die Kurve bei voll adiabatischer Versuchsanordnung infolge der höheren Probentemperatur etwas anders verlaufen würde, ist diese Art und Weise der Berücksichtigung der Wärmeverluste einwandfrei. Den Einwand, den ich gegen diese Anordnung vor allem ins Feld führe ist der, daß zur genauen Bestimmung der Abbindewärme hier mindestens die doppelte Versuchsdauer notwendig ist und daß die Apparatur noch reichlich kompliziert ist. Die Versuchsanordnung zur Erzielung einer voll-adiabatischen Versuchsanordnung ist nicht umständlicher aber man erspart dabei die Hälfte der Zeit.

Die Lösungsmethode erfordert ein verhältnismäßig schwierig zu handhabendes Gerät in Form eines Kalorimeters zur Bestimmung der Lösungswärme. Deshalb schon kommt der Versuch für Baustellen kaum in Frage. Ferner kann auf diesem Wege auch nur eine Zahl bestimmt werden, nämlich die Wärmemenge, welche vom abbindenden Zement bis zu der Zeit frei wird, bis zu welcher das eine Zementpulver hydratisiert wurde. Wir haben also keine Möglichkeit, durch einen einzigen Versuch den zeitlichen Verlauf der Wärmeentwicklung zu überwachen. Es sind vielmehr eine große Reihe von Versuchen notwendig, die dann, wie aus der Literatur eindeutig hervorgeht, eine große Streuung in den Ergebnissen aufweisen. Zudem ist es recht schwierig, die freigewordene Wärmemenge für die ersten Stunden der Hydratisation zu bestimmen. Dies gilt für den Versuch, die Abbindewärme auf Grund der Lösungswärme des fertigen Zementes zu bestimmen. Von Forsén[10]) wird jedoch der Weg vorgeschlagen, die Abbindewärme des Zementes auf Grund seiner chemischen Analyse zu bestimmen, indem man vorher den Beitrag der einzelnen Bestandteile des Zementes zur Abbindewärme versuchsmäßig mittels der Lösungsmethode fest-

[10]) Zement 1935, S. 196.

legt (s. S. 2). Dieser Weg wird jedoch von Eitel[11]) als nicht immer zuverlässig abgelehnt und der Bestimmung der Abbindewärme mit Hilfe der Methode der Lösungswärme für den fertigen Zement der Vorzug gegeben.

Zu empfehlen ist die Methode der Lösungswärme, wenn es gilt, Unterschiede zwischen Zementen verschiedenster Herkunft in thermischer Beziehung absolut und wissenschaftlich exakt festzulegen, und wenn dabei nur nach der überhaupt möglichen Wärmeentwicklung während des Abbindeprozesses gefragt ist.

Betrachtet man jetzt die Methode der Lösungswärme im ganzen, und zwar mit der Möglichkeit, auch die Wärmetönungskurve eines Zementes durch beliebig häufige Wiederholung des Lösungsversuches für die einzelnen Zeitabschnitte zu bestimmen, so erhebt sich die Frage, ob bzw. in welcher Weise diese Kurve bei Ermittlung der zu erwartenden Höchsttemperatur im Massenbauwerk berücksichtigt werden kann. Dabei ist zu beachten, daß beim Lösungsversuch praktisch keine Erwärmung während des Versuches vor sich geht, während im Bauwerk sich die Temperatur langsam erhöht; ferner muß berücksichtigt werden, daß beim Lösungsversuch reines Zementpulver gelöst wird und im Bauwerk dieser Zement gemischt mit Wasser und Zuschlagstoffen vorliegt. Schon aus den beiden eben angeführten Gründen ergibt sich eine große Schwierigkeit, die beim Lösungsversuch ermittelte Wärmetönungskurve bei Ermittlung der Höchsttemperatur im Massenbauwerk zu verwenden.

Dem Ziel, einen Zement mit möglichst einfachen Mitteln objektiv beurteilen zu können, kommt m. E. die adiabatische Methode am nächsten. Dabei ergibt sich auch die Möglichkeit, nicht nur reinen Zement, sondern auch bauwerksmäßigen Beton untersuchen zu können. Zwar kann auch hier der Einwand gemacht werden, daß die Apparatur zu lange von einer Probe besetzt ist, und daß der Verlauf der chemischen Reaktionen im Gerät anders als im Bauwerk vonstatten geht, da alle Wärme gespeichert wird. Dem ist entgegen zu halten, daß in keiner Apparatur die Bedingungen zu schaffen sind, bei denen der Beton im Bauwerk erhärtet, da sich diese von Fall zu Fall ändern können. Die Speicherung aller Wärme und der damit verbundene schnellere Temperaturanstieg bedingen zwar eine Beschleunigung der vor sich gehenden chemischen Prozesse, kürzen aber damit die Versuchsdauer ab. Im übrigen ist aber durch Versuche an Bauwerken einwandfrei festgestellt,

[11]) Zement 1935, S. 229.

daß bereits wenige Meter hinter den Oberflächen des Bauwerks volle Wärmeisolierung herrscht, d. h. daß die Bedingungen der adiabatischen Versuchsanordnungen erfüllt sind. Dafür besteht aber bei der adiabatischen direkten Methode die Möglichkeit, Mörtel oder gar den Bauwerksbeton selbst untersuchen zu können, und das adiabatische Gerät kann durchaus einheitlich hergestellt werden, so daß auch absolute Vergleiche möglich sind. Will man die zu erwartende Höchsttemperatur im Massenbauwerk ermitteln, so braucht man lediglich bei Betrachtung der erzielten Wärmetönungskurve zu berücksichtigen, daß im kleineren Bauwerk eventuell nicht vollkommene Wärmeisolation vorhanden ist. Die Versuche, die in anderen Teilen der Arbeit (s. S. 22) angeführt sind, werden zeigen, daß es durchaus angängig ist, sich auf Grund der adiabatischen Kurve vom zeitlichen Verlauf des Wärmeanstiegs im Bauwerk, wo nur unvollkommene Isolation herrscht, ein angenähert zutreffendes Bild zu machen.

Abschließend ist noch erwähnenswert, daß in Trondheim mit dem „semi-isothermen" Gerät Versuche in der Richtung gemacht wurden, ob es auch bei den verschiedensten Feuchtigkeitsgehalten der Luft genügend gleichmäßig arbeitet. Es besteht ja die Gefahr, daß die zur Isolierung gewählte Korkfüllung bei verschiedenem Feuchtigkeitsgehalt verschieden gut isoliert und so die Eichnung zunichte macht. Es wurde bewiesen, daß diese Bedenken nicht bestehen. Demgegenüber stehe ich jedoch auf dem Standpunkt, daß eine größere Durchfeuchtung etwa unbeobachtet erfolgen kann, welche durch Augenschein später nicht mehr feststellbar ist und die Richtigkeit der Ergebnisse in Frage stellt, wenn die Eichnung des Gerätes nicht öfters wiederholt wird.

Als Ergebnis dieser ersten kritischen Betrachtungen kann folgendes angesehen werden:

Den Vorzug unter den verschiedenen möglichen Versuchsanordnungen bei Ermittlung der Wärmetönung von Zementen und Beton verdient das adiabatische Gerät, weil es bei Isolierung mit Luftschichten und einfach zu steuernden Heizungen bei gleicher Herstellung am ehesten dazu geeignet ist, auf möglichst einfachem Wege zu übereinstimmenden Ergebnissen bei der Untersuchung des Betons zu gelangen.

In den nun folgenden Abschnitten sollen diese Vermutungen durch Versuchsergebnisse belegt werden.

III. Eigene Versuche.

1. Aufzählung und Beschreibung.

Zur vergleichenden Überprüfung der verschiedenen Möglichkeiten bei Bestimmung der Abbindewärme auf direktem Wege sind die nachfolgend beschriebenen Versuche angestellt worden:

a) Die Wärmekiste.

Sie ist in früheren Versuchen bei Vergleichen verschiedener Zemente bezüglich ihrer Abbindewärme benutzt worden. Abb. 3 zeigt die Wärmekiste, welche im wesentlichen eine Holzkiste von 32×32 cm Grundfläche und 38 cm Höhe ist; in der äußeren Kiste ist eine zweite kleinere Holzform von 20×20×29 cm Außenmaßen

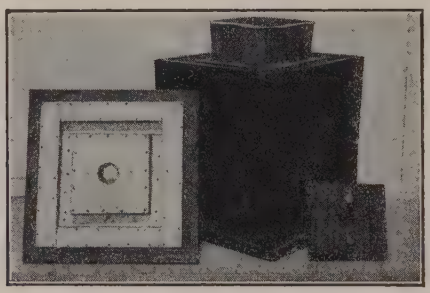


Abb. 3.

untergebracht, welche von der äußeren durch etwa 4 cm Kieselgur zur Wärmeisolation getrennt ist. Der darin eingestellte konische Zinkblechbehälter wird mit Zementbrei von etwa 6000 gr gefüllt. (In Abb. 3 ist dieser Zinkbehälter aus der inneren Holzfassung etwas herausgezogen). Der Zinkblechbehälter ist mit einem Holzdeckel nach oben verschlossen. Der Deckel (Abb. 3 rechts unten) sitzt rd. 7 cm vom oberen Rand entfernt dicht über der Oberfläche des eingefüllten Breies. Auf den Holzdeckel wird Putzwolle aufgebracht und das gesamte Gefäß mit einem Holzdeckel verschlossen, welcher zur besseren Abdichtung Aussparungen hat, in welche die senkrechten Holzwände eingreifen. Die Temperatur wird mittels Stabthermometer gemessen; das Thermometer wird durch Löcher in dem

oberen und unteren Deckel in ein Metallrohr geführt, welches direkt in dem Zementbrei steckt und zur besseren Wärmeübertragung mit etwas Quecksilber gefüllt ist.

b) Die Thermosflasche.

Eine 1/2 Liter-Thermosflasche wurde mit Zementbrei gefüllt und in eine mit Putzwolle ausgelegte Blechbüchse gestellt. Die Thermosflasche wurde nach oben hin mit einem kräftigen Wattebausch verschlossen. Die Temperaturmessung geschah direkt mittels eines Thermometers, welches im quecksilbergefüllten Metallrohr steckte.

Zur noch besseren Behinderung der Wärmeabströmung wurde folgender zweiter Thermosflaschenversuch durchgeführt: Eine 1/4 Liter-Thermosflasche, nach oben wie eben beschrieben verschlossen, wurde in ein Wasserbad gestellt, welches mittels einer Gasflamme dauernd auf derselben Temperatur gehalten wurde, wie der Zement im Flascheninnnern. Die Temperatur im Zementbrei wurde wieder mittels Thermometer gemessen.

c) Adiabatisches Gerät.

Das Gerät wurde mit der Absicht entwickelt, die eingebrachte Zementprobe ohne jeden Wärmeverlust nach außen hin für längere Zeit aufbewahren zu können, d. h. also, alle beim abbindenden Zement frei werdende Wärme soll lediglich die Temperatur der Probe steigern. Dies sollte dadurch erreicht werden (s. Abb. 4), daß ein konisches Kupfergefäß von 11 cm unterem, 14 cm oberem Durch-

Das adiabatische Gerät
Schnitt

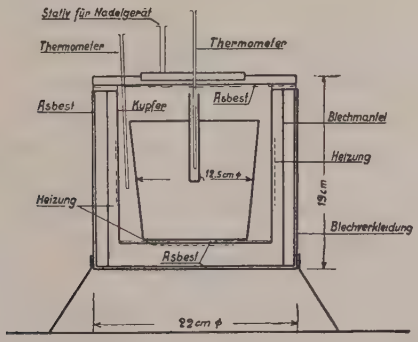


Abb. 4.

messer und 12,5 cm Höhe in ein zweites zylindrisches Kupfergefäß gestellt wurde, welches um einige cm größer als das innere ist. Um das größere Kupfergefäß wurde eine elektrische Heizung gelegt, welche zur Erzielung gleichmäßiger Temperatur im Innern des Zylinders am Boden etwas stärker heizt als an den Seiten. Die Wärmeabstrahlung nach außen ist durch Auskleidung der inneren Wände mit Asbest verringert. Außerdem ist zwischen dem äußeren Kupfergefäß und der äußeren Blechwand noch ein dünner Blechzylinder eingestellt. Abb. 5 zeigt das Gerät auseinandergenommen:

Abb. 5.

rechts unten stehend den inneren Topf für den Zementbrei im Drahtgestell mit Isolierrollen zur Distanzhaltung gegenüber dem äußeren Kupfergefäß; links den Deckel, enthaltend die beiden mit Asbestwolle gedichteten Öffnungen zur Einführung der Thermometer in den Zementbrei und den inneren Luftmantel und das etwas umgeänderte Vicat-Nadel-Gerät, auf einer drehbaren Metallscheibe befestigt zur Vornahme der Prüfung über den Verlauf des Erhärtens, über den im zweiten Teil der Arbeit eingehend berichtet werden soll. Der Deckel ist nach unten mit einer Asbestschicht isoliert.

Abb. 6 zeigt das Gerät in betriebsfertigem Zustand. Ein Strom mittels geeignet geschalteter Glühbirnen, jeweils im erforderlichen Maß gedrosselt, wird in die Boden- und Seitenheizung geschickt, um der im Zement herrschenden Temperatur immer das Gleichgewicht zu halten. Diese Temperaturreglung kann im Anfang des Versuches mit genügender Genauigkeit von Hand geschehen, auch ohne dauernde Überwachung des Gerätes. Bei höheren Temperaturen hat es sich jedoch als zweckmäßig erwiesen, als äußeres Thermometer ein Kontaktthermometer anzuordnen, welches mit Hilfe eines Schaltschützes einen konstanten kräftigen Strom je nach Bedarf ein- oder abschaltet. Es ist lediglich erforderlich, von Zeit zu

Zeit das Kontaktthermometer auf die innere Zementtemperatur einzustellen. Das innere Thermometer ist wie bei allen vorher beschriebenen Versuchen in ein quecksilbergefülltes Metallröhrchen geführt.

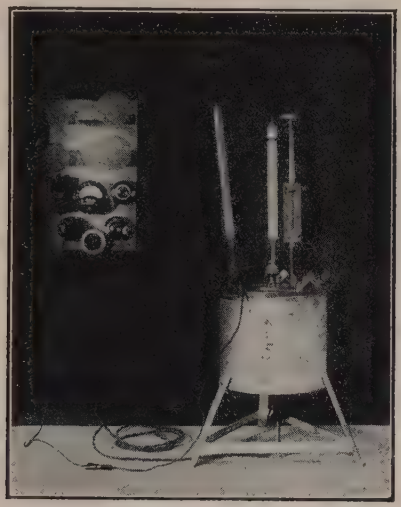


Abb. 6.

Bei Anwendung von reinem Zementbrei als Probemasse arbeitete dieses Gerät sehr zufriedenstellend, aber nur bis zu einer gewissen Grenze. Es trat die zu erwartende Tatsache ein, daß binnen kurzer Versuchszeit 100° erreicht wurden und dann ein Auskochen des zum Anrühren verwandten Wassers eintrat, was seinerseits wieder einen Temperaturrückgang zur Folge hatte (s. Anl. 1).

Es sollte nun zunächst einmal, unabhängig von der Frage, ob überhaupt die Prüfung von reinem Zementbrei hinsichtlich der Wärmetönung Zweck hat, untersucht werden, ob durch geeignete Versuchsanordnung, etwa durch irgendwelches Abschließen des Gefäßes, ein Aussieden des Wassers verhindert oder zumindest auf ein erträgliches Maß herabgemindert werden könnte.

In diesem Bestreben wurde zunächst das Kupfergefäß mit einem eingetriebenen Kupferdeckel abgeschlossen (s. Abb. 5 auf dem Kupfertopf). In der Mitte hat der Deckel eine genau eingepaßte Öffnung zur Einführung des für die Temperaturmessung benötigten Eisenröhrchens. Aber weder der Versuch den Dampf nach außen

abzuführen, um dadurch ein sich immer wiederholendes Verdampfen und Wiederkondensieren des Wassers zu vermeiden, noch der Versuch, das Probegefäß mit dem Deckel einfach abzuschließen, hatten den erhofften Erfolg.

Der einzig noch mögliche Weg, einen durch das Verdampfen des Wassers entstehenden Überdruck aufzunehmen, wurde deshalb auch versucht. Abb. 7 zeigt den eiserenen Behälter und den

Abb. 7.

schwachwandigen konischen Zinkzylinder für die Aufnahme des Breies. Durch den Zinkzylinder sollte verhindert werden, daß der Zementbrei direkt an den Eisenwänden des Druckbehälters anliegt und sich dort übermäßig abkühlt, da ja zu erwarten stand, daß der eiserne Behälter mit der verhältnismäßig großen Wärmekapazität erst langsam durch die äußere Heizung auf dieselbe Temperatur wie der innere Zement gebracht würde. Das Röhrchen zur Aufnahme des Thermometers ist direkt an dem Metalldeckel befestigt. Der Deckel wurde mittels Bleidichtung und Schrauben genügend dicht an das eigentliche Gefäß herangepreßt.

Auch diese Versuchsanordnung hatte nicht den gewünschten Erfolg, da die Temperatur, welche ja in dem am Deckel befestigten Eisenröhrchen gemessen wurde, allzusehr von der großen Masse des Deckels beeinflußt wurde. Wie die Kurven auf Anl. 2 zeigen, macht sich dieser Einfluß erst beim Steilanstieg der Erwärmung bemerkbar. Ein Vergleich der Kurven I und III lehrt, daß auch die Wandungen des Eisenbehälters auf die Temperaturentwicklung Einfluß haben. Es wäre also zu versuchen, das Metallrohr unter Wahrung genügender Dichtigkeit mit einem Mittel mit dem Deckel zu verbinden, welches die Wärme sehr schlecht leitet. Zudem müßte jedoch auch durch Überheizung während des Steilanstieges für genügende Erwärmung des Behälters von außen her Sorge getragen werden. Der Verwirklichung dieser beiden Ziele stellen sich jedoch derartige Schwierigkeiten in den Weg, und zudem birgt jede Überheizung so große Unsicherheiten für das Versuchsergebnis in

sich, daß auch dieser Weg, wie die Versuchsberichte zeigen werden, fallen gelassen werden mußte.

Die eben genannten Schwierigkeiten bei der Versuchsdurchführung, die schon früher gemachten Überlegungen und auch die Tatsache, daß bei einer Steigerung der Versuchstemperatur auf 100° und mehr, die ja in praktischen Fällen nirgends im Bauwerk erreicht werden kann, chemische Prozesse zur Auslösung kommen, die mit denen beim im Bauwerk abbindenden Beton keinerlei Beziehung haben, führten dazu, die Versuche mit reinem Zementbrei aufzugeben und bald zu versuchen, die Temperatur durch Magerungsmittel während des ganzen Versuches unter 100° zu halten. Angewandt wurden Zementnormensandgemische 1 : 1 bis 1 : 3 nach Gewichtsteilen. Normensand wurde deshalb als Magerungsmittel verwandt, weil wegen des gleichmäßigen und immer gleichbleibenden Korns die Möglichkeit bestand, gleichzeitig mit dem Temperaturverlauf auch durch den abgeänderten Vicat-Nadel-Versuch den Fortgang der Erhärtung festzustellen.

Auch die Versuche mit den Zementnormensandgemischen im adiabatischen Gerät wurden mit dem Kupfergefäß offen und abgedeckt (s. S. 15) durchgeführt, um den Einfluß der nicht abgedeckten gegenüber der abgedeckten Mörtelprobe feststellen zu können [13]).

Weiterhin wurde der Mörtel nicht direkt in das Kupfergefäß, sondern in einem dünnwandigen Zinkbehälter eingebracht, welcher durch allseitig angordnete Hartgummiknöpfe gegenüber dem Kupfertopf abgestützt ist (s. Abb. 5 unten, Mitte). Das Zinkgefäß ist mit einem dichtsitzenden Deckel abgeschlossen. Das Loch zur Einführung des Metallröhrchens ist mit Hartgummi ausgekleidet. Der Kupfertopf ist dann nochmals durch einen Deckel geschlossen (Abbildung 5, rechts lehnend). Es sollte hiermit erreicht werden, daß die Probe noch unabhängiger von eventuellen Heizungsfehlern ist, um somit auch bauwerksmäßigen Beton, bei dem nur verhältnismäßig geringere Temperaturanstiege zu erwarten waren, untersuchen zu können. Auf den Nadelversuch mußte natürlich bei den mit dieser Anordnung angestellten Versuchen verzichtet werden.

d) Übrige Versuche.

Außer den unter a—c beschriebenen Versuchsanordnungen wurden noch weitere recht einfache gewählt, die an der betreffenden

[13]) Ähnliche Überlegungen stellte Vogt, Trondheim, an, wovon der Verfasser erst während der Untersuchungen Kenntnis erhielt.

Stelle im Versuchsbericht genauer beschrieben sind. Zweck dieser Versuche mit den verschiedensten Zinkkästen mit Papier umhüllt oder in der Glaswanne stehend usw. ist der Versuch, sich von der Abänderung der Wärmetönungskurve ein Bild machen zu können, wenn derselbe Zement angewandt wird, aber schlechtere Isolierung der Probe vorliegt.

2. Bericht über die durchgeführten Versuche.

Bei Beginn der Versuche sowohl der mit reinem Zementbrei als auch der mit Zementnormensandgemischen ergab sich erst die Notwendigkeit, bei allen oben genannten Versuchsanordnungen einige Fragen über Art und Weise der Versuchsdurchführung systematisch zu klären. In Übereinstimmung mit Marcotte[14]) und anderen wurde gefunden, daß auf immer genau die gleiche Anfangstemperatur geachtet werden muß, wenn Vergleiche auf Grund der Temperaturkurve gezogen werden sollen. Nun wurde folgende Beobachtung gemacht: Werden Wasser und Zement auf dieselbe Temperatur gebracht, und rührt man aus beiden einen Brei an, so macht sich sofort ein kräftiger Temperaturanstieg bemerkbar. Nacken[15]) gibt die Erklärung für diesen Anstieg wie folgt: Ein sehr kalkreicher Anteil des Zementmehles wird bei der Wasserzugabe sofort stürmisch unter kräftiger Wärmeentwicklung zersetzt.

Lerch und R. H. Bogue[16]) erklären diese sich zuerst entwickelnde Wärme als Lösungswärme. Die Größenordnung und die Geschwindigkeit dieser ersten Wärmeerzeugung mußte zunächst näherungsweise für die verschiedenen Zemente ermittelt werden; dies geschah wie folgt: Zementmehl und Wasser wurden schichtweise in eine Thermosflasche gefüllt und die Temperatur sofort nach Einbringen durch ein eingestecktes Thermometer gemessen. Die sich dabei für einen normalen Portlandzement ergebende Wärmeanstiegskurve ist auf Anl. 3 dargestellt. Für verschiedene andere Zemente ergab sich mit genügender Genauigkeit dieselbe Kurve. Man sieht, daß diese erste Wärmeentwicklung nach 15 Minuten im wesentlichen beendet ist. Es ergibt sich nun die Frage, wie dieser erste Temperaturanstieg beim Einbringen des Zementbreies in die Geräte zu berücksichtigen ist. Soll alle vom Zement entwickelte

[14]) Chimie et industrie, 1934, S. 1291.
[15]) Zement, 1929, S. 1366.
[16]) Zement, 1935, S. 169.

Wärme gespeichert werden, so ergibt sich die Notwendigkeit, Zement und Wasser abwechselnd schichtweise in die Geräte einzubringen, und wenn möglich im Gerät selbst zu mischen. Das bietet aber nicht nur bei der Ausführung erhebliche Schwierigkeiten, sondern die Durchfeuchtung der einzelnen Zementschichten ist auch nicht genügend gleichmäßig, um Sicherheit zu haben, daß der Abbindeprozeß in allen Teilen der Mischung mit der notwendigen Gleichmäßigkeit vonstatten geht. Zudem ist für den Fall der schichtweisen Einfüllung in das adiabatische Gerät wegen der nicht genügenden Gleichmäßigkeit des Gefüges im Brei keine Möglichkeit vorhanden, den Verlauf der Erhärtung durch die Vicat-Nadel zu prüfen. Deswegen wurde bei allen hier vorgenommenen Versuchen so verfahren, daß Zement, Sand und Wasser mit gleicher Eigentemperatur in einem gleichtemperierten Gefäß eingerührt wurden. Nach Fertigstelung des Breies wurde dann sofort mit dem Einfüllen in die Geräte begonnen, so daß 15 Minuten nach dem Beginn des Anrührens die Geräte versuchsfertig geschlossen waren. Die Erfahrung hat gezeigt, daß der bei dieser Art und Weise des Einfüllens verlorengehende Teil der entwickelten Wärme verhältnismäßig gering ist und das Endergebnis des Versuches nicht wesentlich beeinflußt. Durch mehrere unter genau denselben Bedingungen durchgeführten Versuche wurde auch bewiesen, daß die Temperaturanstiegskurven in allen Fällen mit genügender Genauigkeit beieinanderlagen, daß also der verlorengehende Teil der Wärme bei den verschiedenen Versuchen etwa immer gleich war. Da zudem festgestellt wurde, daß bei den verschiedensten untersuchten Zementen — normale Portlandzemente bis höchstwertige Zemente — der erste Wärmeanstieg annähernd gleich war, so dürfte diese Art der Einbringung des Zementbreies bei den praktisch in der Mehrzahl vorliegenden Fällen immer eine genügende Genauigkeit verbürgen.

In diesem Zusammenhang ist weiter die Tatsache zu beachten, daß Zementpulver, welches einige Stunden an der Luft liegt, sich in thermischer Beziehung ändert[17]). Will man also Vergleiche ziehen, etwa zur Überprüfung einer Apparatur zur Bestimmung der Wärmetönung hinsichtlich ihres gleichmäßigen Arbeitens, so ist es erforderlich, bei Versuchsbeginn in eine genügend große luftdicht abzuschließende Büchse soviel Zement abzufüllen, daß er für alle erforderlichen Versuche reicht.

---

[17]) Zement, 1932, S. 643 und S. 658.

Zum Vergleich von Zementen auf Grund der Wärmetönung ist noch die Wahl des Wasserzusatzes von wesentlichem Einfluß. Zu den normengemäß vorgeschriebenen Zementprüfungen wird Brei von sogen. Normensteife verwandt, d. h. also, bei verschiedenen Zementen wird mit verschiedenem Wasserzusatz gearbeitet. Bei Untersuchung der Wärmetönung ist es dagegen nicht angängig, verschiedenen Wasserzusatz zu wählen. Um dies nachzuweisen, sind Vergleichsuntersuchungen angestellt worden, deren Ergebnis auf Anl. 4 dargestelt ist. Es wurde normaler Portlandzement einmal mit 24 v. H. Wasser und derselbe Zement mit 30 v. H. Wasser angerührt und sofort in vorher auf ihre Gleichmäßigkeit geprüfte 1/2-Liter-Thermosflaschen gefüllt. Die Tatsache, daß Kurve II (Zement mit 30 v. H. Wasser) einen späteren Steilanstieg und eine niedrigere Höchsttemperatur aufweist, zeigt an, daß das Wasser als Magerungsmittel wirkt. Es ist klar, daß Wasser auch bei den Zementnormensandgemischen als Magerungsmittel wirkt. Dabei ist es gelungen, bei einem bestimmten geeigneten Mischungsverhältnis von Zement zu Sand einen Wasserzusatz zu finden, der für alle in Frage kommenden Zemente einen genügend kellengerechten Mörtel liefert, um damit alle gewünschten Untersuchungen durchführen zu können.

Nach Klarstellung dieser Vorfragen sollen nun zunächst erst einige Hinweise in der Literatur, die Wärmetönung von Zementen betreffend, durch Versuche geprüft werden. So z. B. wird an mehreren Stellen behauptet, der Wärmeversuch sei geeignet, ein Umschlagen des Zementes einwandfrei festzustellen. Bezüglich dieser Frage sagt Marcotte[18]), daß umgeschlagener Zement bei Untersuchung der Wärmetönung der Form nach dieselbe Kurve ergibt wie derselbe im frischen Zustand, nur nicht so hoch ansteigt. Dies hat sich durch die angestellten Versuche nicht bestätigt. Zwar stimmt, daß der umgeschlagene Zement eine nicht so hohe Abbindetemperatur aufweist, jedoch ist die Wärmekurve der Form nach grundlegend anders. Auf Anl. 5 sind die Wärmetönungskurven von einem frischen und einem umgeschlagenen normalen Portlandzement dargestellt. Beide Zemente sind mit 27 v. H. Wasser angerührt, wobei der umgeschlagene Zement vorher im Mörser zerrieben und durch das 900 Maschensieb gegeben wurde. Beide Zemente wurden unter gleichen Bedingungen in 1/2 Liter-Thermosflaschen geprüft. Der umgeschlagene Zement zeigt einen bedeutend früher

[18]) Génie civile, 1933, I., S. 86 ff.

liegenden Temperaturanstieg als der frische Zement, der erst 1¾ Stunden nach dem Hauptanstieg des umgeschlagenen Zementes plötzlich in die Höhe schnellt und 100° überschreitet. Auf diese Kurven wird nochmals im 2. Teil der Arbeit näher eingegangen werden. (vergl. S. 38).

Ferner wurde weiter oben schon gesagt, daß ungehinderter Luftzutritt zum etwa ausgebreiteten Zementmehl die Wärmeeigenschaften wesentlich ändern kann. Hierüber Gesetzmäßigkeiten aufzustellen, wurde schon an den verschiedenen Stellen versucht. Schachtschnabel[19]) hat den Einfluß des Luftzutrittes auf die Zemente in Bezug auf ihre Abbindeverhältnisse mit Hilfe der Vicat-Nadel geprüft, konnte jedoch, wie in der genannten Quelle angegeben, nicht zu einer abschließenden Gesetzmäßigkeit kommen. Auch durch im Rahmen dieser Arbeit in dieser Richtung angestellte Versuche war es nicht möglich, durch die Wärmetönung eine Gesetzmäßigkeit zu entdecken. Es machte vielmehr den Anschein, als ob die thermischen Eigenschaften im Laufe einer längeren Belüftung des Zementes hin- und herpendeln. Die Frage wurde jedoch als nicht ihm Rahmen dieser Arbeit liegend nicht näher untersucht.

Die nun folgenden Versuche galten dem Hauptziel der Arbeit, für Vergleichszwecke ein brauchbares, einfaches adiabatisches Gerät zu entwickeln, dessen Wirksamkeit unter Beweis zu stellen ist und dabei die Frage zu klären, in welcher Form am besten der Zement geprüft wird.

In der ersten Versuchsserie war das adiabatische Gerät noch nicht beteiligt. Es wurde Brei aus normalem Portlandzement mit 27 v. H. Wasser angerührt und in Geräten mit ganz verschieden guter Wärmeisolierung geprüft, um zu sehen, wie die Gestalt der Wärmetönungskurve in diesem und jenem Fall aussieht. (S. Anl. 6). Geprüft wurde das Gemisch in der Wärmekiste, in welche Brei von 6000 gr Zement gefüllt wurde (Kurve II); eine andere Probe (Kurve I) wurde in einer Thermosflasche (¼ Liter) im jeweils gleichtemperierten Wasserbad geprüft; eine weitere Probe (Kurve IV) wurde in einem Zinkkästchen, fassend einen Brei von 1940 gr Zement in eine größere Glaswanne gestellt und mit mehreren Lagen Zeitungspapier abgedeckt; Kurve III endlich ist mit derselben Anordnung wie Kurve IV erzielt, jedoch wurde das Glasgefäß nach außen durch mehrfache Papierlagen besser isoliert als bei IV. Die auf Anl. 6 dargestellten Kurven sind nicht ohne weiteres zu ver-

[19]) Zement, 1932, S. 643.

gleichen, da sie auf verschiedene Anfangstemperaturen zurückgehen. Unmittelbar vergleichbar sind Kurve II mit I und III mit IV. Es ist jedoch ohne weiteres die Tendenz festzustellen, daß bei schlechter werdender Wärmeisolierung der Haupttemperaturanstieg wesentlich nach hinten rückt und die Kurven merklich abflachen, eine Tatsache, die hier in Bezug auf S. 11 zur Kenntnis genommen werden soll und im zweiten Teil der Arbeit noch einmal besprochen wird.

Bei Versuchsanordnung I zeigte sich, daß trotz der recht guten Isolierung es nicht möglich war, die Temperatur auf 100° konstant zu halten. Das zeigt an, daß der Verschluß der Thermosflasche durch einen kräftigen Wattebausch keine genügende Isolierung bietet. In diesem Zusammenhang können auch die Erfahrungen mit den Thermosflaschen bei den Versuchen von Anl. 4 erwähnt werden. Bei Versuch II von Anl. 4 ist die Thermosflasche gesprungen. Dieser Fall ist sehr häufig vorgekommen, auch dann, wenn Zement-Sandgemische verwandt wurden, und die Höchsttemperatur weit unter 100° lag. Kurve I zeigt ferner, daß die Abkühlung nach Erreichen der Höchsttemperatur auch sehr rasch vonstatten geht; das beides sind Gründe Thermosflaschen zur Bestimmung der Wärmetönung bei Zementen nicht zu verwenden, wiewohl an einigen Stellen diese Anregung gegeben wurde; es besteht bei Thermosflaschen zudem die Gefahr, daß, wenn sie nicht vorher genau auf ihre Gleichmäßigkeit hin geprüft werden, eine verschieden gute Isolierfähigkeit der Flaschen das Versuchsergebnis in Frage stellt.

Die weiteren Versuche wurden zunächst allein mit dem adiabatischen Gerät durchgeführt, um dessen einwandfreies Arbeiten auf verschiedene Weise zu überprüfen. Auf Anl. 7 sind 6 Kurven dargestellt, die an einem hochwertigen Portlandzement auf verschiedene Art ermittelt wurden. Die Versuche mußten zwar an verschiedenen Tagen durchgeführt werden, jedoch ist der Zement tunlichst vor allen Einflüssen der Luft geschützt worden. Der Probebrei war bei allen Versuchen der Anlage 7 in dem nicht abgedeckten Kupfergefäß untergebracht.

Kurve I ist aufgenommen an einem reinen Zementbrei (3000 gr Zement mit 30 v. H. Wasser). Kurve II stellt die Wärmetönungskurve des Zementnormensandgemisches 1 : 1 mit 18 v. H. Wasser dar. Kurve III und IV zeigen den Wärmeanstieg bei gleichen Zement-Normensandgemischen mit demselben Wasserzusatz; lediglich ist bei den verschiedenen Kurven eine verschiedene Anfangstem-

peratur gewählt worden. Kurve V ist die Temperaturkurve des Zementnormensandgemisches 1 : 2 mit 15 v. H. Wasserzusatz. Bei Kurve VI ist dasselbe Zement-Sandverhältnis und der gleiche Wasserzusatz wie bei V gewählt, jedoch ist dieser Versuch mit einer wesentlich höheren Temperatur begonnen worden.

Aus den aufgetragenen Kurven geht zunächst wieder hervor, daß eine größere Zugabe von Magerungsmittel, in diesem Falle Sand, das Maximum der Kurve herabdrückt und den Hauptanstieg wesentlich zurückverlegt. Es ist dabei zu beachten, daß die größere Zugabe von Sand zum Teil wieder ausgeglichen wird durch den geringeren notwendigen Wasserzusatz. Es wurde nämlich darauf geachtet, die Zement-Normensandgemische von immer etwa der gleichen Verarbeitbarkeit zu erhalten. Dabei sei erwähnt, daß im Falle Zement zu Sand 1 : 1 17 v. H. Wasser bei allen in Frage kommenden Zementen genügen, um einen kellengerechten Mörtel herzustellen.

Aus den Kurven ergibt sich weiter, daß die Zement-Normensandgemische 1 : 1 noch zu fett sind, da bereits nach 10 Stunden Versuchsdauer die Temperaturen im allgemeinen 70° überschritten haben. Es ist dann nämlich bei der gewählten Versuchsanordnung (mit Kupfergefäß ohne Deckel) die Gefahr eines zu großen Wärmeverlustes durch Abdunsten von Wasser vorhanden. Nach den bisherigen Erfahrungen müßte also etwa ein Zement-Normensandgemisch 1 : 2 mit 15 v. H. Wasser für diese Apparatur geeignet sein. Ein Vergleich der Kurven II, III und IV zeigt deutlich, wie empfindlich sich ein nur geringer Unterschied in den Anfangstemperaturen im Verlauf der gesamten Kurve bemerkbar machen kann. Im allgemeinen beweist jedoch der der Form nach einigermaßen gleichmäßige Verlauf der Kurven ein befriedigendes Arbeiten der Versuchsapparatur. Der in Wirklichkeit wohl kaum vorkommende Fall des Versuchsbeginns mit 34° ist in Kurve VI dargestellt. Es soll damit lediglich dargetan werden, welchen außerordentlichen großen Einfluß die Anfangstemperatur im extremen Fall ausüben kann. Ferner zeigt der Vergleich der beiden Kurven V und VI, daß die anfängliche Temperaturdifferenz von etwa 15° keineswegs im Verlauf des ganzen Versuches wiederzufinden ist. Das lehrt, daß die chemischen Prozesse beim erhärtenden Zement gemäß der jeweils herrschenden Temperatur in ganz verschiedener Geschwindigkeit vonstatten gehen. Daraus ergibt sich wieder die Tatsache, daß alle Versuche, Wärmetönungskurven in unvollkommen isolierenden Behältern aufgenommen, durch Abkühlungskurven zu korrigieren, abwegig sind;

man kann höchstens, falls der Versuch über genügend lange Zeit ausgestreckt wird, aus dem Temperaturanstieg und der für das bestimmte Gerät vorher zu bestimmenden Wärmeverlustzahl (bei verschiedenen Temperaturdifferenzen zwischen außen und innen) die pro Zeiteinheit entwickelte Wärmemenge ausrechnen (s. v. S. 6) Will man damit jedoch eine Wärmetönungskurve errechnen, so wird die für denselben Zement je nach der Art des verwandten Gerätes ganz verschieden ausfallen.

Ein Vergleich der Kurven V und VI auf Anl. 7 zeigt ferner, daß der anfängliche Temperaturunterschied von etwa 15° am Ende des Versuches nicht mehr so groß ist. Das steht im Widerspruch zu der schon in früheren Kapiteln ausgesprochenen Erwartung der Beschleunigung der chemischen Prozesse. Es liegt hier also die große Wahrscheinlichkeit vor, daß durch die schon sehr früh vorhandene höhere Temperatur bei VI infolge der nicht abgedeckten Probe durch Verdunsten des Wassers an der Oberfläche ein größerer Wärmeverlust stattgefunden hat als bei V. Es ergibt sich also die Notwendigkeit, die Frage des Wärmeverlustes an der nicht abgedeckten Probe näher zu untersuchen. Aus diesem Grunde und um das adiabatische Gerät noch weiter zu prüfen, wurden folgende Vergleiche angestellt:

Es wurde das neue Gerät mit den bislang schon besprochenen Versuchsanordnungen zur Bestimmung der Wärmetönung verglichen. Um die Möglichkeit eines direkten und sicheren Vergleiches, zu haben, wurden alle Geräte gleichzeitig mit derselben Zementmischung gefüllt und gleichzeitig angesetzt, so daß Unterschiede der Anfangstemperatur, des verschiedenen Wasserzusatzes usw. ausgeschlossen sind.

Auf Anl. 9 sind Kurven aufgetragen, welche das adiabatische Gerät, die ½-Liter Thermosflasche in Putzwolle und die Wärmekiste lieferten. Die Versuche wurden mit normalem Portlandzement und 30 v. H. Wasserzusatz durchgeführt. Schon ½ Stunde nach Versuchsbeginn war ein Temperaturunterschied bei den 3 Proben feststellbar. Dieser Unterschied ist bei späteren Versuchen nicht wieder vorgekommen, beruht also sicher auf verschiedener Temperierung der Geräte bei Versuchsbeginn. Am ehesten leuchtet die tiefste Anfangstemperatur bei III (Wärmekiste) ein, da man hier annehmen kann, daß die etwas kühlere Kiste durch ihre verhältnismäßig große Masse die Probe in der Temperatur gedrückt hat. Der geringe Unterschied der Anfangstemperatur zwischen Kurve I

und II hat wieder eine Verlagerung des Hauptanstieges zur Folge, jedoch steigen beide Kurven recht schön gleichmäßig. Da bei der Thermosflasche wegen ihrer guten Isolationsfähigkeit bei der schnellen Temperatursteigerung, wie sie hier bei reinem Zementbrei vorliegt, ein merklicher Wärmeabfluß nicht erfolgen kann, arbeitet also auch das adiabatische Gerät mit offenstehender Probe bei kurzen Versuchen recht gut. Die Thermosflasche stieg jedoch in der Temperatur höher als das Gerät. Bei Kurve I macht sich ab 95° deutlich ein Knick bemerkbar. Kurz nach 100° biegt Kurve I waagerecht ab, während die Thermosflasche noch weiter ansteigt. Dieses Abknicken der Kurve I und die höhere Temperatur bei II beweisen deutlich den störenden Einfluß der offenstehenden Zementprobe bei Temperaturen in der Nähe des Siedepunktes des Wassers. Nach 10¼ Stunden, bei etwa 104°, zersprang die Thermosflasche, also war der Anstieg über 100° auf den guten Einschluß der Zementprobe zurückzuführen.

An diesem Beispiel mit dem reinen Zementbrei, das absichtlcih als krasser Fall gewählt wurde, zeigt sich deutlich der störende Einfluß der offenstehenden Zementprobe. Es muß nun weiter geklärt werden, ob sich dieser Einfluß auch bei Zement-Normensandgemischen bemerkbar macht. Die Möglichkeit dazu ist ohne weiteres gegeben, wenn man berücksichtigt, daß im Fall von Mörtelmischungen der Versuch sich über bedeutend längere Zeit erstreckt.

Auf den Anlagen 10, 11 und 12 sind die 3 Versuchsanordnungen: Adiabatisches Gerät, Thermosflasche in Putzwolle und Wärmekiste bei verschiedenen Mischungen zwischen Zement und Normensand angewandt worden. Es soll damit festgestellt werden, welche Zement-Normensandmischung die geeignetste ist, um die Wärmeanstiege in mäßiger Größe zu halten.

Zunächst Anl. 10: Verwendet wird ein normaler Portlandzement im Mischungsverhältnis 1 : 1 mit Normensand und 18 v. H. Wasserzusatz. Die Form der Kurven ist schon offensichtlich ganz anders als auf den Anlagen 9, 11 und 12. Das rührt daher, daß verschiedener Zement bei den Versuchen verwandt wurde. Also ist bestätigt, daß die Wärmetönung geeignet ist, Unterschiede in den Zementen festzustellen. Das Kupfergefäß im adiabatischen Gerät blieb bei dem Versuch auf Anl. 10 offen. Das drückt sich im Verlauf der Kurve dadurch aus, daß Kurve I nach Erreichen von etwa 60° wesentlich flacher wird als die zugehörige Kurve, die die Thermosflasche ergibt. Es zeigt sich hier also bei Temperaturen zwischen

50 und 60° in hohem Maße der störende Einfluß der Oberfläche, weil in diesem Falle wegen der Sandbeimischung die Reaktion schon wesentlich langsamer vonstatten geht als etwa im Fall Anl. 9, I. Es ist also entweder die Temperatur durch weitere Beimengungen von Sand noch tiefer zu halten oder das Gefäß ist zu schließen. Auf allen Kurven ist die schon erwähnte Tatsache ersichtlich, daß bei schlechter werdender Isolierung die Kurven verflachen und der Haupttemperaturanstieg wesentlich nach hinten rückt.

Ein zweiter Versuch mit demselben Zement, aber mit geschlossenem Kupfergefäß im adiabatischen Gerät ergab, daß die Kurve des adiabatischen Gerätes höher anstieg als die Kurve mit der Thermosflasche ermittelt; jedoch ist die Mischung 1 : 1 noch nicht zweckmäßig, da die Temperaturen im allgemeinen noch zu hoch steigen.

Auf Anl. 11 sind die Kurven dargestellt, welche mit einem Zement-Normensandgemisch 1 : 2 nach Gewichtsteilen und 15 v. H. Wasserzusatz ermittelt wurden. Es sind zwei Versuchsserien durchgeführt worden. Die Versuchsanordnungen waren dieselben wie auf Anl. 10. Das eine Mal war im adiabatischen Gerät das Kupfergefäß offen, beim anderen Mal blieb es geschlossen. Auch hier knickt noch die Kurve Ia (Kupfergefäß offen) bei etwa 55° sichtlich ab, also macht sich auch hier noch der störende Einfluß der nicht abgedeckten Oberfläche bemerkbar, weil sich eben die Reaktion bei den schwächeren Mischungen immer mehr verlangsamt. Kurve I (bei geschlossenem Behälter) stimmt sehr gut mit der in der Thermosflasche erreichten überein, d. h. die Wärmeisolierung ist etwa vollkommen, da bei 60° der Wärmeverlust in der Thermosflasche in diesem Zeitraum nur gering sein kann, was sich auch durch Beobachtung einiger Versuche mit Thermosflaschen über ca. 2 Tage bestätigt hat und andererseits die Kurven I und IIa einigermaßen parallel verlaufen. Die Kurven I und II, die gleichzeitig aufgenommen wurden, lehren, daß offenbar im adiabatischen Gerät (Kurve I) eine bessere Isolierung herrscht als in der Thermosflasche. Kurve I steigt nämlich früher und auch höher an als II. Dieselbe Erscheinung zeigt sich auch bei den auf Anl. 12 aufgezeichneten Versuchsergebnissen. Also dürfte man aus diesen Tatsachen auf ein zuverlässigeres Arbeiten des adiabatischen Gerätes gegenüber dem Thermosflaschenversuch schließen. (Vergl. hierzu S. 27). Die Versuche mit dem Index a sind 7 Tage nach den anderen auf Anl. 11 dargestellten Versuchen durchgeführt. Die Eigenschaften des Zementes haben sich offenbar in dieser Zeit geändert, da bei allen Ge-

räten die Kurve „a“ etwas früher ansteigt und höher liegt als die zugeordnete frühere Kurve.

Um den abgeänderten Vicat-Versuch im Gerät durchführen zu können, soll nach Möglichkeit erreicht werden, mit dem nicht abgedeckten Kupfergefäß einwandfrei eine Wärmetönungskurve aufnehmen zu können. Deshalb wurde eine weitere Mischung Zement zu Normensand 1 : 3 untersucht; jedoch wurde nur der Vergleich zwischen der Thermosflasche und dem adiabatischen Gerät gezogen, da für die Wärmekiste dieser Versuch wegen des zu geringen Temperaturanstiegs nicht mehr von praktischem Wert ist. Das Ergebnis der Versuche ist auf Anl. 12 dargestellt.

Auch bei dieser Mischung tritt noch die für diesen Zement (s. Anl. 9 und 11) eigentümliche Kurvenform zutage. Die Versuche Ia und III liegen 4 Tage später als I und II. Auch in dieser Zeit ist offenbar trotz sorgfältigster Aufbewahrung des Zementes eine Umänderung erfolgt, welche sich durch einen weiter rückwärts liegenden Haupttemperaturanstieg bei den späteren Versuchen bemerkbar macht. Das fast waagerecht liegende Kurvenstück von Ia zwischen der 18. und 28. Stunde gegenüber dem abfallenden Kurvenstück von I in der gleichen Zeit könnte auf die Umänderung des Zementes zurückzuführen sein, obgleich vermutet werden darf, daß hier eine Ungleichmäßigkeit bei den Thermosflaschen schuld ist. Kurve II liegt zwar mit dem Hauptanstieg vor Kurve III, jedoch knickt II wegen der offenstehenden Probe schon bei etwa 46° im Gegensatz zu den Kurven III und IV fast waagerecht ab. Also ist auch bei dieser schwachen Mischung, will man einwandfreie Temperaturwerte für eine längere Versuchsdauer haben, ein Abdecken der Mörtelprobe unabwendbar. Noch schwächere Mischungen anzuwenden hat sich als unzweckmäßig erwiesen, weil in diesem Falle die Temperaturanstiege zu gering waren. Es wäre dann auf alle Fälle notwendig gewesen, eine größere Menge als Probe zu wählen und trotzdem das Gefäß abzudecken.

Am Gerät war weiterhin noch zu klären, ob die Temperatur im Luftbad zwischen Kupfergefäß und äußerem Kupfermantel von der Heizung bestimmt wird, wie es beabsichtigt ist, und wie es nach den auf S. 26 angegebenen Erfahrungen auch der Fall zu sein scheint, oder ob evtl. die Mörtelprobe wegen der zu dichten Berührung mit der Luft deren Temperatur maßgebend beeinflußt. Ferner muß untersucht werden, ob evtl. die Probe durch die Heizung in der Temperatur gesteigert werden kann. Zu diesem Zweck wurden die Versuche von Anl. 8 durchgeführt.

Verwandt wurde zu allen Versuchen ein höchstwertiger Portlandzement, und zwar im Gemisch mit Normensand im Verhältnis 1 : 1 und 18 v. H. Wasserzusatz. Die Kurve I ist durch normale Bedienung des Gerätes erzielt. Bei Kurve III wurde von Versuchsbeginn an die Temperatur des umgebenden Luftbades dauernd um 5° höher gehalten, als die Zementtemperatur jeweils war. Bei Versuch II wurde dagegen die äußere Luft um 5° kühler gelassen. Der Ausfall der Kurven beweist, daß das Gerät in der erstgenannten Beziehung richtig arbeitet, d. d., daß das Luftbad seine Temperatur nach der Heizungstemperatur einstellt, auch wenn, wie im vorliegenden Fall, ein höchstwertiger Zement mit verhältnismäßig schneller Reaktion vorliegt. Gleichzeitig lehren aber auch die Kurven, daß die Heizung genügend genau einzustellen ist, um nicht die Betonprobe in der Temperaturentwicklung zu beeinflussen.

Da auch bei dem geschlossenen Kupfergefäß, lagen Heizungsfehler vor, sich ähnliche Einflüsse geltend machten wie sie eben auf Anl. 8 dargetan wurden, sollte durch weitere Isolierung (Probe im eingestellten Zinkbehälter, s. v. S. 17) eine Verbesserung des Gerätes erzielt werden. Es gelang mit dieser Anordnung, die Kurve IV von Anl. 12 aufzunehmen. Diese steigt während der ganzen Versuchsdauer (28 Stunden) Es genügte bis dahin, die Heizungsregulierung mit Hilfe des Kontaktthermometers vollauf. Im weiteren Verlauf wäre eine sorgfältigere Temperaturregelung notwendig gewesen oder die Probe hätte in ihrer Masse größer sein müssen.

3. Zusammenfassung der Ergebnisse des Teiles A.

Die Richtigkeit der Behauptung, daß die Wärmetönungskurve dazu geeignet ist, Zemente auf bestimmte Eigenschaft hin zu prüfen, ist durch die Versuche hinlänglich bewiesen. Zusammenfassend bringt dies auch Anl. 13 zum Ausdruck, wo die Wärmetönungskurven für einen höchstwertigen, einen hochwertigen und einen normalen Portlandzement dargestellt sind. Die Betrachtungen auf S. 8 ergeben dasselbe wie die Versuche, nämlich, daß es wertvoll ist, eine Wärmetönungskurve zu haben und nicht nur einen Wert der Gesamt-Abbindewärme, wenn man von den Ergebnissen dieser Prüfung auf den Zement als solchen schließen will. Es muß ein Gerät vorgeschlagen werden, welches vollkommen adiabatisch arbei-

tet, d. h. vollkommener Abschluß der Probe (Oberfläche) ist erforderlich. Es sollen mit dem hier zu entwickelnden Gerät jedoch keine wissenschaftlichen exakten Messungen über die vom Zement entwickelte Wärmemenge angestellt werden, sondern das Gerät soll zu Vergleichsmessungen etwa auf der Großbaustelle oder im Laboratorium Verwendung finden. Nur soll das Gerät adiabatisch arbeiten, um die Versuchsergebnisse mit für den praktischen Fall genügender Genauigkeit mit anderen Stellen vergleichen zu können.

Reiner Zementbrei kommt als Probe nicht in Frage, da die Temperaturen zu hoch ansteigen. Als zweckmäßig hat sich für alle vorkommenden Zementarten ein Gemisch von 1 Gewichtsteil Zement und 3 Gewichtsteilen Normensand mit 14 v. H. Wasser ergeben. Ein Gemisch von Zement mit Normensand ist angebracht, wenn man einen Zement als solchen prüfen will und die Ergebnisse mit anderen Versuchsstellen vergleichen will. Man kann diese Wärmetönungskurve auch bei der Ermittlung der zu erwartenden Höchsttemperatur im Massenbauwerk verwenden, da man, will man die Wärmeanstiegskurve für das Massenbauwerk haben, nur die eventuell schwächere Mischung und die unvollkommene Isolierung gemäß der Beschaffenheit des betreffenden Bauwerks berücksichtigen muß. Besser ist es jedoch, in diesem Fall den Bauwerksbeton direkt zu untersuchen.

Das hier entwickelte adiabatische Gerät arbeitet einwandfrei, falls die Versuche bei Zement-Normensandgemischen 1 : 3 über nicht mehr als 24 Stunden erstreckt werden. Auf sorgfältigen Abschluß der Probe ist jedoch Wert zu legen, d. h., die Versuchsanordnung wie bei Kurve IV, Anl. 12, ist empfehlenswert.

Soll jedoch Bauwerksbeton im Gerät geprüft werden oder soll der Versuch mit einem Zement-Normensandgemisch über längere Zeit ausgedehnt werden, so ist auf eine größere Probemasse Wert zu legen, und will man die Betonprobe von kleinen zufälligen Heizungsfehlern unabhängiger machen, muß eine noch weitergehende Isolierung der Betonprobe in Vorschlag gebracht werden. Beide Wege konnten aus zeitlichen Gründen nicht mehr durch Versuche erprobt werden, jedoch scheint deren Richtigkeit auf Grund der vielen angestellten Versuche mit den verschiedensten Variationen außer Zweifel zu sein. Der Verfasser kommt für die Isolierung der Probe im Gerät zu folgendem Vorschlag: (s. Abb. 8):

Um den Einfluß der Heizung auf die Probe möglichst gering zu

halten, ist eine Probe von etwa 3 Liter zu wählen und diese wie folgt zu isolieren: Die Mörtelprobe kommt in ein dünnwandiges konisches Blechgefäß und wird mit einem Deckel aus gleichem Material verschlossen. Das Thermometer wird wie bei den angeführten Versuchen in ein Metallröhrchen gesteckt, welches seinerseits in die Öffnung des Deckels eingepaßt ist. In das Röhrchen kommt zur besseren Wärmeleitung eine bestimmte Menge Quecksilber. Das konische Kupfergefäß wird durch ein Dewar-Gefäß ersetzt, in wel-

Vorschlag zur Unterbringung der Probe im adiabatischen Gerät

Schnitt

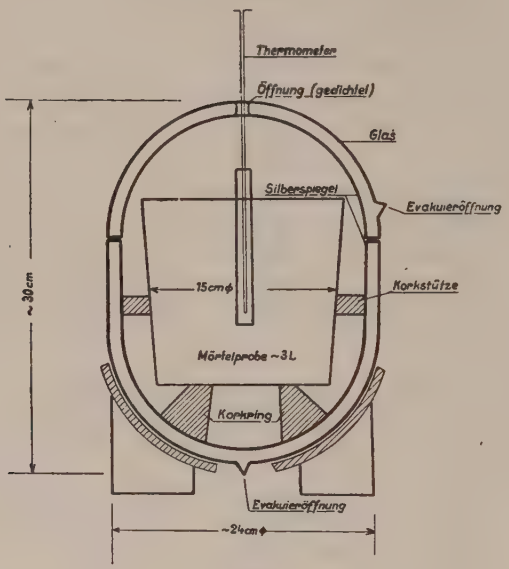


Abb. 8.

chem mit geringem allseitigem Abstand das Blechgefäß eingestellt wird. Die Einführungsstelle für das Thermometer wäre oben und unten durch aufgeklebte Astbestringe sorgfältig zu dichten. Bei dieser Art der Isolierung würde die Heizungsregelung anfänglich von Hand und dann mittels Kontaktthermometer genügen.

Will man jedoch ein vollkommen selbständiges Arbeiten des Apparates erreichen, um in größeren Beobachtungspausen vor kleinen Heizungsfehlern sicher zu sein, so wäre der von Davey [20]) ent-

[20]) Structural Engineer, July 1935.

wickelte Temperaturregler (s. Abb. 9) vorzuschlagen. Er arbeitet wie folgt: Besteht zwischen den beiden senkrecht stehenden Glassäulen eine Temperaturdifferenz, so ändert sich der Druck des Chloroformdampfes und die Quecksilbersäule verschiebt sich und öffnet oder schließt den Stromkreis, der über ein Relais den Hauptstrom für die Heizung steuert. Der untere Teil der quecksilbergefüllten Röhre ist als Kapillare ausgebildet. In der angeschmolzenen Glaskugel am linken Ende des Rohres ist Quecksilber untergebracht, um dieses für eventuelles Nachfüllen in das Rohr zur Verfügung zu haben. Das angebrachte Lot dient zur richtigen Einstellung bzw. zur Eichung des Reglers.

Temperaturregler nach Davey

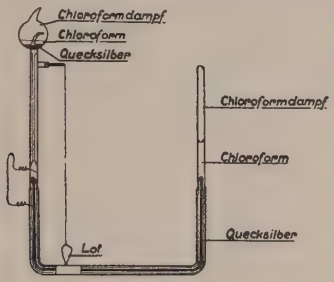


Abb. 9.

Bei Anwendung dieses Temperaturreglers würde jedoch eine einfachere Isolierung der 3-Liter-Probe etwa nach der Art wie bei Kurve IV auf Anl. 12 genügen, jedoch ist es dann notwendig, den einen Arm des Reglers von unter her in die Betonprobe einzuführen; dies könnte leicht ähnlich wie auf Abb. 1 ausgeführt werden.

Man kann sich, ohne die hier z. Teil aus anderen Gründen durchgeführten umfangreichen Vergleichsversuche durchzuführen vom einwandfrei adiabatischen Arbeiten einer gewählten Versuchsanordnung auf anderem Wege überzeugen:

Man führt dem Behälter, der zur Aufnahme der Probemasse bestimmt ist, laufend eine konstante Wärmemenge etwa auf elektrischem Wege zu. Gleichzeitig liest man unter normaler Bedienung des jeweiligen Gerätes die Temperaturen im Probebehälter ab. Arbeitet das Gerät vollkommen adiabatisch, so zeigt sich das an der Temperaturanstiegskurve in Bezug zur zugeführten Wärmemenge

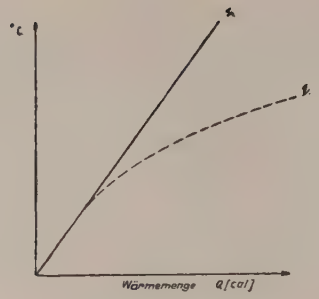


Abb. 10.

(s. Abb. 10), welche in diesem Fall eine Gerade sein muß (Linie I). Verläuft die Temperatur etwa nach Linie II, so zeigt das Wärmeverluste im Probebehälter an. Diese einwandfreie Prüfung der Dewar-Gefäße ist bei allen hier beschriebenen Geräten anwendbar. Die Eichung wurde jedoch in diesem Fall nicht durchgeführt.

Aus der neuesten Literatur[21]) geht hervor, daß, bezüglich der Prüfverfahren für die Wärmetönung der Internationale Unterausschuß der Weltkraftkonferenz dem im September 1936 in Washington stattgefundenen Kongreß das vereinfachte adiabatische Verfahren der „Building Research Station" (s. v. S. 4) vorgeschlagen hat. Eine endgültige Stellungnahme ist jedoch bis jetzt noch nicht bekannt.

IV. Wege zur Vorbestimmung der zu erwartenden Höchsttemperatur im Massenbauwerk.

In diesem Zusammenhang soll kurz auf den Weg eingegangen werden, der bei Bestimmung der zu erwartenden Höchsttemperatur in einem bestimmten Bauwerk einzuschlagen ist. Es ist von vornherein festzustellen, daß die auftretende Temperatur im fertigen Bauwerk in hervorragendem Maße von der Art und Weise des Arbeitsprozesses bei der Herstellung des Bauwerks und von dessen Abmessungen abhängig ist, d. h. die zu erwartende Temperatur richtet sich entscheidend nach der Geschwindigkeit des Einbringens des Betons, der Höhe der jeweiligen Betonschicht und der Zeit, die bis zur Aufbringung der nächsten Schicht verstreicht. Es ist auch klar, daß die Jahrestemperatur beim Einbringen des Be-

[21]) Lea „Zement, 1937, S. 277 ff."

tons eine gewisse Rolle spielt. Zunächst ist es wichtig zu wissen, daß in einem massigen Bauwerk ein Zement verwendet wird, welcher überhaupt eine geringe Abbindetemperatur aufweist. Alsdann ist von Wichtigkeit zu wissen, mit welcher Geschwindigkeit die Wärme in den ersten Stunden frei wird; dies deswegen um schätzen zu können, wieviel von der Abbindewärme beim Aufbringen der nächsten Schicht bereits freigeworden und wieviel davon möglicherweise schon abgeflossen ist. Man hat nun die Möglichkeit, bei der Auswahl der Zemente zunächst etwa nach der Methode der Lösungswärme die bis zu einem bestimmten Zeitpunkt der Hydratisierung überhaupt freiwerdende Wärmemenge zu bestimmen und danach einen geeigneten Zement mit geringer Abbindewärme auszuwählen. Dann kann man durch einen direkten Temperaturmessungsversuch an der zu verwendenden Betonmischung im adiabatischen Gerät die Geschwindigkeit der Wärmeabgabe bei vollkommener Isolierung als Kurve aufnehmen. Daraufhin hat man die Möglichkeit, aus der Geschwindigkeit der Wärmeentwicklung und der Geschwindigkeit der Bauwerksherstellung, unterstützt durch Daten, die durch die praktische Erfahrung zu erhalten sind, in Anbetracht der Jahreszeit und der Größenabmessungen des Bauwerks auf die zu erwartende Höchsttemperatur zu schließen. Über diese Fragen ist verschiedentlich gearbeitet worden[22]). Der Vollständigkeit halber sollten sie nur kurz erwähnt werden.

Das Problem, die zu erwartende Höchsttemperatur im Bauwerk auf Grund praktischer Messungen über Wärmeverluste am Bauwerk selbst rechnerisch zu bestimmen, hat V o g t, Trondheim, in seiner Schrift gelöst: „Analysis of Rise in Temperature during Hardening of Concrete".

Mit demselben Problem befaßt sich auch S a n d r i[23]). Der Unterschied zwischen den Verfahren von Vogt und Sandri besteht lediglich in der verschiedenen mathematischen Erfassung der Wärmeverluste. Das hat zur Folge, daß die endgültigen mathematischen Ausdrücke für die Wärmeverluste am Bauwerk bei beiden Verfassern grundsätzlich verschieden sind. Von S a n d r i wurde jedoch festgestellt, daß beide Verfahren zu denselben Ergebnissen führen.

---

[22]) Zement 1933, S. 303 und Zement 1935, S. 196.
[23]) Zement 1936, S. 743 ff.
Sitzungsberichte der Akademie der Wissenschaften in Wien 1935, 144/IIa, S. 607 ff.

Teil B.

VERLAUF DER WÄRMETÖNUNGSKURVE EINES ZEMENTES UND SEINE BEZIEHUNGEN ZU DEN ABBINDEVERHÄLTNISSEN DES ZEMENTES.

I. Einwände gegen den Vicat-Versuch und neue Vorschläge zur Festlegung der Abbindeverhältnisse.

Nach den Normen werden gegenwärtig in Deutschland die Abbindeverhältnisse mit Hilfe des Vicat-Nadel-Gerätes geprüft. Dieses Gerät wird seit Jahren von verschiedenen Seiten abgelehnt mit der Begründung, es sei zu ungenau und die Ergebnisse auch bei zuverlässsiger Prüfung zu schwankend. So z. B. berichtet Haegermann[24]), daß er Zemente in den verschiedensten Untersuchungsanstalten in Deutschland und auch in anderen Ländern untersuchen ließ, und z. B. bei Festlegung der Abbindeverhältnisse die auseinanderliegendsten Ergebnisse bei Bestimmung des Abbindeendes mit 4 und 20 Stunden ermittelt wurden. Kleinlogel und Hajnal Kony[25]) berichten, daß an anderem Ort Normensand auf Zementfeinheit gemahlen, mit Wasser zu einem Brei von Normensteife angerührt wurde, und daß dieser Brei nach 4 Stunden mit der Vicat-Nadel nicht mehr zu durchdringen war. Das deutet darauf hin, daß die Angabe des Abbindeendes auf Grund des Vicat-Versuches in erhöhtem Maße von einer gewissen Austrocknung der angerührten Masse abhängt. Der Versuch mit dem gemahlenen Normensand wurde auch vom Verfasser durchgeführt und ähnliche Ergebnisse gefunden, wenn auch der Zeitpunkt, den man als Abbindeanfang bezeichnen könnte, wesentlich später lag als bei Zementen; vorausgesetzt natürlich, daß man die Probe normengemäß lagert, d. h., vor zu großer Austrocknung schützt. Haegermann

[24]) Zement 1927, S. 991.
[25]) Zement 1933, S. 2.

stellt weiterhin fest, daß alle Bestimmungen der Abbindeverhältnisse von Zementen auf Grund der Zunahme der inneren Reibung und der Festigkeit der Probe leicht zu Fehlergebnissen führen können. Er nimmt in seinem angeführten Aufsatz zur Bestimmung der Abbindeverhältnisse auf Grund des Wärmeversuches positiv Stellung.

Wenn auch heute bei sorgfältiger, normengemäßer Versuchsdurchführung kaum Schwankungen in den oben genannten Ausmaßen feststellbar wären, so ist doch einer gewissen Gegnerschaft gegen den Vicat-Versuch zuzustimmen, wenn man die Schwierigkeit berücksichtigt, auf Grund der normengemäß festgelegten Kennzeichen Abbindebeginn- und -ende als Zeitpunkt genau festzulegen, und wenn man in Betracht zieht, daß kleine Unterschiede in der normengemäßen Lagerung der Proben vorkommen können und diese das Versuchsergebnis beeinflussen.

Es sind im Laufe der Zeit schon die verschiedensten Versuche unternommen worden, den Vicat-Versuch durch einen anderen geeigneteren zu ersetzen. Marcotte[27]) schlägt vor, die Eindringtiefe mit der Vicat-Nadel in regelmäßigen Abständen festzustellen und die einzelnen Tiefen in einem Diagramm in Bezug zur Zeit aufzutragen und aus dieser Kurve auf die Abbindeverhältnisse zu schließen. Die Kurve, so stellt Marcotte fest, hat einen ähnlichen Verlauf wie die Temperaturkurve. Das ist für ihn Grund zur Annahme, daß man die Temperaturkurve ihrerseits zur Bestimmung der Abbindeverhältnisse eines Zementes benutzen kann. Automatisch mit der Vicat-Nadel arbeitende Geräte sind auch schon konstruiert worden, jedoch wohl wegen ihres komplizierten Aufbaues nicht eingeführt worden.

Im Jahre 1901 schlug Gary zur Bestimmung der Abbindeverhältnisse von Zementen einen Thermographen[26]) vor. Er bestand im wesentlichen aus einem Hartgummiring, wie er heute bei dem Vicat-Versuch angewandt wird. In den Ring kam der Zementbrei, welcher durch diesen und durch einen umgebenden Isolierkasten gegen Luftzutritt und schnelle Abkühlung geschützt war. Die Temperatur im Probeninneren wurde direkt gemessen und automatisch in einem Temperaturzeitdiagramm aufgetragen. Gary wollte den Haupttemperaturanstieg zur Festlegung des Abbindebeginns- und -endes

---

[26]) Zement 1927, 947.
[27]) Génie Civile, 1933, S. 86.

benutzen. Seine Zeiten stimmten jedoch nicht mit den nach Vicat ermittelten überein.

Der Versuch, die Abbindeverhältnisse auf Grund der Wärmetönung zu bestimmen, wird auch in den Veröffentlichungen der Zementwerke: „Ritergut Rüdersdorf“ [28]) unternommen. Man kommt dort zu der Feststellung, daß man das Abbindeende mit dem Erreichen einer bestimmten Temperatur festlegen könnte.

Der Vollständigkeit halber sollen in diesem Zusammenhang auch einige vollkommen andere Verfahren Erwähnung finden, mit denen man die Abbindeverhältnisse an Zementen bestimmen wollte.

Michelsen[29]) schlägt vor, in die Abbindeprobe ein Kupfer-Blei-Element einzubauen, welches im Verlauf des Abbindens Spannung gibt. Nach Angabe von Michelsen hat dieses Element die Eigenschaft, in der ersten Zeit nach dem Anrühren verschieden starke Ströme zu erzeugen, um dann in einer weiteren Periode Spannung von steigender Größe zu erzeugen. Der Zeitpunkt des Beginns der steigenden Spannungserzeugung soll mit dem Beginn des Abbindens, der Zeitpunkt des Erreichens des Spannungsmaximums indentisch mit dem Ende des Abbindens sein. Während das Maximum mit dem Abbindeende gut übereinstimmt, liegt jedoch der Beginn des Spannungsanstieges zeitlich vor dem nach Vicat festgestellten Abbindebeginn. Tonerde-Zement ließe sich mit diesem Gerät nicht erfassen.

Würzner[30]) nimmt auch gegen den Vicat-Nadel-Versuch Stellung, stellt jedoch fest, daß weder die Wärmetönung noch das eben besprochene elektrische Gerät zur Bestimmung der Abbindeverhältnisse geeignet ist. Er schlägt vor, die Eigenschaft des abbindenden Zementes, zu bestimmten Zeitpunkten Wasser an sich zu reißen, in Form einer geeigneten Apparatur zur Festlegung der Abbindeverhältnisse anzuwenden. Dieser schon im Jahre 1919 gemachte Vorschlag hat aber offenbar keinen Eingang gefunden.

---

[28]) Die Thyssenzemente, 1930.
[29]) Zement 1933, S. 457.
[30]) Tonindustrie-Zeitung, 1933, S. 707.

II. Eigene Versuche zur Klärung des Zusammenhangs zwischen Wärmetönungskurve und Abbindeverhältnissen.

1. Berichte über die durchgeführten Versuche.

Zunächst wurde der Vorschlag von Marcotte, die mit der Vicat-Nadel erzielten Eindringtiefen zeitlich aufzutragen, versucht, um aus der so erhaltenen Kurve auf die Abbindeverhältnisse zu schließen. Weiter wurden die im Rahmen des Teiles A der vorliegenden Arbeit angestellten Versuche über Ermittlung der Wärmetönungskurven an den verschiedenen Zement-Normensandgemischen und an reinem Zementbrei mittels der Geräte mit verschieden vollkommener Isolierung verglichen mit den für die entsprechenden Zemente ermittelten Vicat-Zeiten. Dabei wurde auch der Vicat-Versuch normengemäß und mit Abänderung durchgeführt. Im adiabatischen Gerät wurde endlich die Erhärtung der eingestellten Probe gleichzeitig mit der Feststellung der zugehörenden Wärmekurve verfolgt; dies geschah mit dem Nadelversuch in abgeänderter Form.

Um diesen letzten Versuch anstellen zu können, wurde auf dem adiabatischen Gerät eine abgeänderte Vicat-Nadel angebracht. Die Anordnung ist aus Abb. 4 und 5 ersichtlich. Die Nadel ist genau so schwer wie beim normalen Vicat-Gerät, nämlich 300 g. Die Nadel selbst ist allerdings länger, da sie den unter dem Deckel befindlichen Luftraum überbrücken muß. Das Stativ zur Befestigung der Nadel ist auf einer Metallscheibe von 11 cm Durchmesser befestigt, welche auf dem eigentlichen Deckel etwas versenkt und drehbar angeordnet ist. Der Deckel des Gefäßes enthält 20 Bohrungen, kreisförmig angeordnet und die Scheibe für das Stativ unter der Nadel eine Öffnung für das Durchführen der Nadel. Durch Drehen der oberen Scheibe besteht also die Möglichkeit, während des Versuches an 20 verschiedenen Stellen, die im Kreis angeordnet sind, nacheinander die Erhärtung der Probe zu verfolgen. Wird keine Nadelprüfung vorgenommen, so ist durch jede beliebige Zwischenstellung zwischen 2 Löchern das Gerät immer vollkommen abgeschlossen.

Auf Anl. 14 ist zunächst der Vorschlag von Marcotte verwirklicht. Für einen normalen Portlandzement sind die im normalen Vicat-Gerät ermittelten Eindringtiefen bei normaler Lagerung der Probe im Verhältnis zur Zeit aufgetragen. Der Zement ist dabei

derselbe, wie er zu den Versuchen auf Anl. 10 angewandt wurde. Offensichtlich ist diese Kurve auf Anl. 14 mit keiner der auf Anl. 10 dargestellten identisch oder auch nur der Form nach ähnlich. Durch die hier angestellten Versuche hat sich also die Ansicht von Marcotte in keiner Weise bestätigt. Es dürfte sich auch überhaupt keine Übereinstimmung zwischen den beiden Kurven erzielen lassen, wie man auch den Wärmeversuch abändern mag, da ja in den ersten Stunden vor Abbindebeginn immer der Brei von der Nadel vollkommen durchdrungen wird, d. h. also, daß immer die Ordinate 0 aufzutragen ist, während sich dann nur etwa während zwei Stunden ein Kurvenstück ergibt. Beim Wärmetönungsversuch steigt jedoch schon von Anfang an die Kurve an, um dann nach einem Übergang schnell emporzuschnellen, um später wiederum zu verflachen.

Es galt also nun zu prüfen, ob wenigstens prinzipiell eine Beziehung zwischen der Gestalt der Wärmetönungskurve und den Abbindezeiten nach Vicat festgestellt werden konnte. Hierzu wurde ein besonders extrem gearteter Fall gewählt: Ein frischer und ein umgeschlagener normaler Portlandzement wurden geprüft, wie sie mit ihren Wärmetönungskurven und Abbindezeiten übereinstimmen. Auf Anl. 5 sind die Wärmetönungskurven mit einer ½-Liter-Thermosflasche ermittelt aufgetragen und die zugehörigen Vicatzeiten vermerkt. Erinnert sei daran, daß der umgeschlagene Zement für beide Versuche im Mörser zerrieben und durch das 900-Maschen-Sieb gegeben wurde. Offensichtlich ist die Tatsache, daß der umgeschlagene Zement einen früheren Haupttemperaturanstieg und auch einen früheren Abbindebeginn hat als der frische Zement. Hier wäre also eine einheitliche Tendenz festzustellen. Aber schon das Abbindeende wurde für beide Zemente nach Vicat auf den gleichen Zeitpunkt ermittelt, während keine Eigenschaft der Wärmetönungskurven hierauf hinweisen könnte. Es ist überhaupt festzustellen, daß nach den hier gemachten Erfahrungen sich die Abbindezeiten nach Vicat nicht durch besonders charakteristische Punkte der Wärmetönungskurve festlegen lassen.

Aus den Kurven auf Anl. 6 geht hervor, daß bei gleichem Zement der Haupttemperaturanstieg bei schlechter werdender Wärmeisolierung des angewandten Gerätes wesentlich nach hinten rückt. Das lehrt: Will man den Haupttemperaturanstieg als charakteristische Stelle in der Wärmetönungskurve zur Festlegung von Zementeigenschaften benutzen, so ist es erforderlich, ein bestimm-

tes Gerät zur Aufnahme der Wärmetönungskurve, am besten wieder ein vollkommen adiabatisch arbeitendes, zu wählen.

Nach diesen Erkenntnissen ist durch die eigentlichen Hauptversuche in dieser Richtung die Frage eines eventuellen Zusammenhanges zwischen der Wärmetönungskurve und den Abbindezeiten näher zu klären. Hierzu sind die Kurven der Anl. 9—12 geeignet, wenn sie mit den zu den betreffenden Zementen gehörenden Vicatzeiten verglichen werden. Dabei werden jedoch, was zu beachten ist, sowohl reiner Zementbrei als auch verschiedene Zement-Normensand-Gemische angewandt. Ganz gleich, welche Apparatur zur Bestimmung der Wärmetönung angewandt wird, ist offensichtlich, daß der Haupttemperaturanstieg mit der Erhärtung des Zementes bei keinem der hier angewandten Gemische in irgend einem Zusammenhang steht. Also hat sich die Vermutung von Anl. 5 bestätigt. Auch das Verfahren, die Abbindezeiten mit dem Erreichen einer bestimmten Temperatur festzulegen, versagt. Es kann in dieser Beziehung nur etwa das gleiche gesagt werden, wie in der Schrift: „Die Thyssenzemente 1930", daß die meisten Abbindetemperaturen in dem Bereich von etwa 30—60° liegen. Ganz abgesehen davon, daß dieser Bereich bei den Mörtelmischungen etwas tiefer liegt (in der oben erwähnten Schrift ist reiner Zementbrei behandelt), kann man durch eine derart allgemeine Angabe keineswegs Abbindezeiten festlegen.

Andererseits hat sich aber bei allen Versuchen eine gute Übereinstimmung gefunden zwischen der Erhärtung des Mörtels oder reinen Zementbreies im adiabatischen Gerät und den hinzugehörenden Vicat-Zeiten. Es konnte nämlich im adiabatischen Gerät genügend genau der Zeitpunkt festgelegt werden, zu welchem erstmals die auf die Mörtelprobe aufgesetzte Nadel den Mörtel nicht mehr bis zum unteren Anschlag zu durchdringen vermochte und zweitens der Zeitpunkt, zu welchem ein Eindringen in die Probe überhaupt nicht mehr möglich war. Das Gerät ist so konstruiert, daß die Nadel höchstens 5 cm in den Probebrei eindringen kann. Es hat sich weiterhin durch gleichzeitig angesetzte Vicat-Versuche an reinem Zementbrei gezeigt, daß die eben beschriebenen Zeitpunkte, welche im adiabatischen Gerät festgestellt wurden, genügend genau mit dem Abbindebeginn und Abbindeende nach Vicat übereinstimmten. Es wurde weiter festgestellt, bis zu welchem Normensandanteil in der Mischung der Nadelversuch im Gerät noch vorgenommen werden kann, und es zeigte sich, daß auch bei einem

Mischungsverhälnis Zement : Normensand = 1 : 3 nach Gewichtsteilen, wie es auf Anl. 12 behandelt ist, die Punkte, die in den Kurven mit 1 und 2 bezeichnet sind, noch eindeutig feststellbar waren. Ein Vergleich der Kurve auf den Anlagen 9—12 lehrt, daß bei Mörtelmischungen die Punkte 1 und 2 (im adiabatischen Gerät festgestellt) fast immer kurz nach dem Abbindebeginn- und -ende nach Vicat liegen, während bei reinem Zementbrei dies gerade umgekehrt ist. Jedoch sind diese festgestellten zeitlichen Unterschiede zwischen den einzelnen Daten nicht sehr groß.

Der normale Vicat-Versuch geht, wie die in diesem Zusammenhang durchgeführten Versuche bewiesen haben, auch mit Normensandgemischen verschiedener Zusammensetzung durchzuführen und liefert ähnliche Werte wie der Vicat-Versuch an Zementbrei von Normensteife, jedoch sind die Schwankungen in den Ergebnissen auch vorhanden und sind sogar noch größer als die bei den Versuchen mit reinem Zementbrei.

Die Versuche auf den Anlagen 9—12 zeigen, daß ein Übereinstimmen des Haupttemperaturanstieges mit den Abbindezeiten von Vicat nur erreicht werden könnte, wenn ein vollkommen adiabatisch arbeitendes Gerät angewandt wird und darin reiner Zementbrei geprüft wird. Da sich aber reiner Zementbrei wegen der zu hohen Endtemperatur für das adiabatische Gerät nicht eignet, wurde der auf Anl. 15 dargestellte Versuch in einer ½-Liter-Thermosflasche in Putzwolle durchgeführt; von dieser Versuchsanordnung ist durch die durchgeführten Versuche hinlänglich bekannt, daß sie bei dem recht schnell vor sich gehenden Versuch in dem hier interessierenden Zeitraum mit genügender Genauigkeit adiabatisch arbeitet. Die Wärmekurve wurde an einem normalen Portland-Zement mit 27 v. H. Wasserzusatz — also von Normensteife — aufgenommen. Gleichzeitig wurde der Vicat-Versuch für diesen Zement mit demselben Wasserzusatz bei normengemäßer Luftlagerung und bei Lagerung der Probe unter Wasser durchgeführt. Die Tatsache, daß der Abbindebeginn und das Abbindeende bei Wasserlagerung ½ Stunde später als bei Luftlagerung liegen, bestätigt den Einwand gegen den Vicat-Versuch, der anführt, daß die Ergebnisse des Vicat-Versuches durch eine Austrocknung der Zementprobe beeinflußt werden können. Andererseits könnte auch die bei Wasserlagerung niedere Temperatur der Probe gegenüber der Luftlagerung schuld an dem später liegenden Abbindebeginn- und -ende sein, dies deswegen, weil, wenn das Wasserbad auch die

gleiche Temperatur wie die Luft hat, die große Wahrscheinlichkeit besteht, daß die sich im Zementbrei entwickelnde Wärme im Wasserbad schneller abgeleitet wird als im Luftbad. Jedoch dürfte m. E. bestimmt dem ersten Faktor, also dem Austrocknen bei Luftlagerung, das Übergewicht zu geben sein, zumal durch Nebenversuche festgestellt wurde, daß Temperaturunterschiede von der hier in Frage stehenden Größenordnung ohne Einfluß sind. Eindeutig ist jedoch auch hier festzustellen, daß keiner der ermittelten Vicat-Werte mit einem Punkt der Wärmekurve eindeutig übereinstimmt. Es liegt auch bei diesem Versuch noch der Hauptanstieg nach dem Abbindeende.

Nach diesem letzten Ergebnis besteht jedoch die Möglichkeit, daß bei Speicherung aller Wärme, vom ersten Augenblick der Berührung zwischen Wasser und Zement angefangen, ein besseres Übereinstimmen der Vicat-Werte mit dem Haupttemperaturanstieg erzielbar ist. Deshalb wurde bei dem auf Anl. 16 dargestellten Versuch Zement und Wasser schichtweise in eine Thermosflasche gefüllt, so daß 30,6 v. H. Wasser bei dem Zementbrei Verwendung fanden. (Die Thermosflasche wurde in Putzwolle gesteckt). Der Vicat-Versuch wurde am selben Zement durchgeführt mit 30,6 v. H. Wasser und mit dem zur Normensteife erforderlichen Wasserzusatz von 27 v. H. Beide Proben wurden normengemäß in feuchter Luft gelagert. Hier kann man einer Übereinstimmung zwischen den Werten nach Vicat bei 30,6 v. H. Wasserzusatz und der Wärmetönungskurve derart feststellen, daß der Abbindebeginn etwa am Anfang, das Abbindeende dagegen am Ende des Hauptwärmeanstieges liegt. Die Vicat-Zeiten mit Normensteife zeigen jedoch wieder die übliche, nicht mit der Wärmekurve zusammenhängende Lage.

2. Ergebnis der Versuche des Teiles B.

Die Betrachtungen des Teiles B zusammenfassend kann folgendes gesagt werden: Ein eindeutiger Zusammenhang zwischen den Abbindezeiten nach Vicat und der Wärmetönungskurve von reinem Zementbrei ist nur in dem Falle auffindbar gewesen, in dem alle Wärme vom Mischen an adiabatisch gespeichert wurde. Bei Zement-Normensandgemischen ließ sich ein Zusammenhang nicht finden.

Der Vicat-Versuch ist auch mit Zement-Normensandgemischen durchführbar und liefert ähnliche Ergebnisse wie der normengemäße Vicat-Versuch, jedoch sind auch die Schwankungen in den Versuchsergebnissen vorhanden, bei schwächeren Mischungen sogar in größerem Maße als bei dem Vicat-Versuch mit reinem Zementbrei.

Im adiabatischen Gerät ließen sich entsprechend dem Abbindebeginn- und -ende nach Vicat 2 Punkte 1 und 2 festlegen (1 = erste Behinderung beim Eindringen der Nadel; 2 = Eindringen nicht mehr feststellbar). Führt man den Nadelversuch im adiabatischen Gerät aus, so ist der schon von anderer Seite erhobenen Forderung, den Vicat-Versuch bei bestimmter Temperatur durchzuführen, in etwa Genüge getan. (Sandri[31]) schlägt vor, den Vicat-Versuch bei 28° durchzuführen). Wie die Kurven auf den Anlagen 9—12 zeigen, ist bei den Versuchen im adiabatischen Gerät bis zum Abbindeende im Mittel etwa diese Temperatur vorhanden.

Den Vicat-Versuch bei bestimmter Temperatur durchzuführen ist angebracht, denn die Ergebnisse sind, wenn auch in geringem Maße, von der Temperatur abhängig.

Da sich für das adiabatische Gerät ein Arbeiten mit reinem Zementbrei wegen der zu hohen Endtemperatur nicht ermöglichen ließ, auch nicht mit dem einfach abgeschlossenen Einstellgefäß, mußte das Bestreben, mit Hilfe des adiabatischen Gerätes eine Kurve aufzunehmen, die durch ihre besonders markanten Stellen auf die Abbindezeiten nach Vicat schließen läßt, aufgegeben werden. Eine Möglichkeit, von Wärmetönungskurven, die an für das adiabatische Gerät geeigneten Zementnormensandgemischen aufgenommen wurden, auf die Abbindeverhältnisse nach Vicat zu schließen, ist nicht gelungen. Auch das anfängliche Bestreben den abgeänderten Vicat-Versuch im Gerät gleichzeitig mit der Aufnahme der Wärmetönungskurve durchzuführen, glückte nicht wegen der dringenden Erfordernis einer vollkommenen Abdeckung der Probe während des Wärmeversuches.

Zu bemerken ist, daß versucht wurde, Beziehungen zwischen zwei vollkommen einander fremden Methoden bei Bestimmung der Abbindeverhältnisse zu finden. Von dem Vicat-Versuch als der einen Methode ist zu sagen, daß sie bereits von einigen Stimmen abgelehnt wird. Es bleibt deshalb als letzter Weg noch übrig zu prüfen, ob der Vicat-Versuch wirklich Abbindezeiten angibt, die

[31]) Zement 1933, S. 593.

für den betreffenden Zement charakteristisch sind, oder ob eventuell Anzeichen vorhanden sind, daß der Wärmeversuch mehr in der Lage ist, irgendwelche charakteristische Zementeigenschaften aufzuzeigen, die man Abbindeverhältnisse nennen könnte.

III. Kritische Betrachtung über die Frage der Abbindezeiten überhaupt.

Da die Versuche, die im Teil B durchgeführt wurden, kein befriedigendes Ergebnis insofern lieferten, als der vermutete Zusammenhang zwischen Haupttemperaturanstieg und Vicat-Zeiten nicht im gewünschten Maße bestätigt wurde, wurde versucht, der Frage der Abbindezeiten unter einem ganz anderen Gesichtspunkt näher zu kommen. Gibt das Ergebnis des Vicat-Versuches in Wirklichkeit den Abbindebeginn und das Abbindeende für den Zement an, so muß sich bei Würfeln, die aus einer über die Dauer der Abbindezeit hinaus abgelagerten Betonmasse hergestellt sind, ein Festigkeitsabfall gegenüber der Druckfestigkeit der Würfel aus frischem Beton bemerkbar machen.

Zur Klärung dieser Frage wurde folgender Versuch durchgeführt: Eine Betonmischung, bestehend aus 2 Teilen Sand, 1 Teil Kies und 400 kg normalem Portlandzement je cbm Fertigbeton bei einem W.Z.F. von 0,5 wurde angesetzt und ergab einen hochplastischen Beton (Ausbreitmaß etwa 45 cm). Aus dieser Mischung wurden sofort 2 Würfel hergestellt; je 2 weitere Würfel wurden nach je einer weiteren Stunde aus derselben Mischung gefertigt, wobei vor Herstellen jeden Würfelpaares die gesamte Mischung nochmals kurz durchgemischt wurde. Es wurden in dieser Weise 9 mal 2 Würfel hergestellt, die letzten also 8 Stunden nach Ansetzen der Mischung. Die Probewürfel wurden 17 Tage lang unter feuchten Säcken gelagert und dann der Druckprüfung unterzogen. Diese ergab, daß die Festigkeit der Würfel, die 8 Stunden nach Ansetzen der Mischung hergestellt sind, durchschnittlich sogar eine größere Festigkeit hatten, als die Würfel, die sofort nach Ansetzen der Mischung in die Formen gebracht waren. Der Abbindebeginn für den verwandten Zement liegt nach Vicat bei $4^1/_2$, das Abbindeende bei $5^3/_4$ Stunden. Gibt der Vicat-Versuch also wirklich Abbindezeiten an, so müßte die Festigkeit etwa der letzten 6 Würfel wesentlich

gegenüber der Festigkeit der ersten zurückstehen. Das Ergebnis zeigt jedoch in gewisser Beziehung das Gegenteil. Bei dem hier durchgeführten Versuch kann der Einwand gemacht werden, daß die ganze Mischung jede Stunde vollkommen durchgemischt wurde und so der Beton nicht ungestört abbinden konnte. Man könnte annehmen, daß dann, wenn die Mischung etwa für die letzten Würfel 8 Stunden ungestört gelegen hätte, das Ergebnis ein anderes gewesen wäre. Dazu kann jedoch festgestellt werden, daß die Mischung nach jeweils einstündigem Liegen etwa von der Zeit 4 Stunden nach dem Anrühren an, sichtlich den Anschein machte, als ob das Abbinden begonnen hätte, da beim Kneten von Hand ein Beginn der Erhärtung durchaus bemerkt werden konnte. Bei jedem noch so kurzen Mischen verschwand jedoch jedes Anzeichen einer Erhärtung. Lediglich wurde die Mischung mit zunehmender Lagerzeit sichtlich derber (trockener).

Die oben erwähnten Versuchsergebnisse stehen vollkommen im Einklang mit den Erfahrungen, die Kindel[32]) in seiner Dissertation auf S. 20 angibt: Er untersuchte 5 verschiedene Betonmischungen in derselben Weise, wie sie eben angeführt wurde, nur indem er die letzten Würfel sogar 24 Stunden nach dem Ansetzen der Betonprobe herstellte. Dabei ließen die Festigkeiten nur bei einer verhältnismäßig trockenen Mischung mit reichlichem Zementgehalt aber auch erst in späteren Stunden wesentlich gegenüber der Anfangsfestigkeit nach. Bei einigen Proben zeigte sich auch der hier festgestellte Festigkeitsanstieg bei Würfeln, die acht Stunden nach Ansetzen der Betonmischung eingebracht wurden. Kindel führt weiter in seiner Dissertation an, daß Burchartz bereits 1911 von eigenen Versuchen berichtet, daß die Festigkeit bei längerem Lagern des Zementmörtels sehr wesentlich gestiegen ist und zieht daraus den Schluß, daß dieses, den Werten nach Vicat widersprechende Ergebnis Grund zu umfangreichen neuen Versuchen sein sollte, um die Frage der Abbindeverhältnisse von Grund auf zu klären. Kindel meint, daß der Wärmeversuch, beim Beton selbst angewandt, zur Klärung dieser Frage beitragen könnte.

Dem Vorschlag, durch umfangreiche neue Versuche die Frage der Abbindezeiten bei Zementen zu klären, ist durchaus auf Grund der bei dieser Arbeit gemachten Erfahrungen zuzustimmen, jedoch kann vermutet werden, daß auch die Wärmetönungskurve des Betons kaum geeignet sein wird, Abbindezeiten festzulegen; denn die

[32]) Kindel: Dissertation Danzig 1932.

Kurven auf Anl. 12 haben etwa in Übereinstimmung mit den in England in adiabatischen Geräten aufgenommenen Kurven fast durchweg für alle Zemente einen stärkeren Temperaturanstieg etwa 12—13 Stunden nach Versuchsbeginn. Es ist aber durch die Arbeit von Kindel bewiesen, daß eine Lagerung des Betons während 12—13 Stunden keinen wesentlichen Festigkeitsabfall zur Folge hat, während man aus der Wärmekurve schließen müßte, daß ein Lagern während dieser Zeitspanne schädlich sein müßte. Es ist ja nun nicht ohne weiteres eine Mörtelmischung 1 Teil Zement : 3 Teilen Normensand mit einer bauwerksmäßigen Betonmischung zu vergleichen; deswegen wäre der Vorschlag von Kindel wert, mit einem nach Erfahrungen dieser Arbeit gebauten adiabatischen Gerät geprüft zu werden.

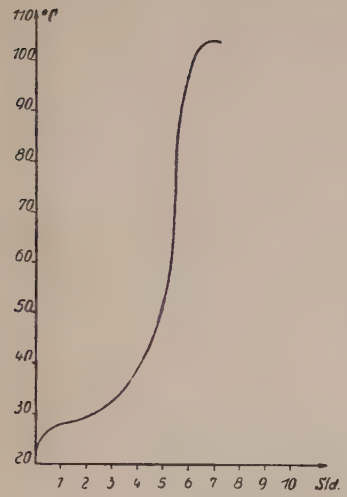
Das Ergebnis der vorliegenden Arbeit.

Es ist mit Hilfe der Wärmetönungskurve möglich, kleine Unterschiede in Zementen festzustellen. Man kann durch die Methode der Wärmetönungskurve (im adiabatischen Gerät aufgenommen) mehr Unterschiede erfassen, als mit der Methode der Lösungswärme, die nur einen Wert gibt. Beim Aufnehmen von Wärmetönungskurven ist nicht reiner Zementbrei zu verwenden, da die Temperaturen in diesen Fällen zu hoch ansteigen. Das Arbeiten mit Temperaturen über 100° bietet Schwierigkeiten bei der Versuchsdurchführung und zudem ist es unzweckmäßig, da im adiabatischen Gerät dann Reaktionen zur Auswirkung kommen können, die denen im Bauwerk vollkommen fremd sind. Die im Teil A angestellten Betrachtungen sollen eine Anregung sein zur Schaffung eines einfachen einheitlichen adiabatischen Gerätes, dessen Aufgabe es sein soll qualitative Vergleiche zu ermöglichen, nicht aber quantitative Messungen. Das hier entwickelte Gerät und auch der Vorschlag sind so gehalten, daß alle Teile einer eventuellen Normung zugänglich sind. Die mit dem Gerät aufgenommenen Wärmetönungskurven sind besonders dazu geeignet den Zement hinsichtlich seiner Verwendungsmöglichkeit im Betonmassenbauwerk zu prüfen.

Beziehungen zwischen den bisher üblichen Methoden, die Abbindezeiten von Zementen zu bestimmen, und den charakteristischen Stellen der Wärmetönungskurven zu finden, ist nicht im gewünschten Maß geglückt. Durch vollkommen anders geartete (Fe-

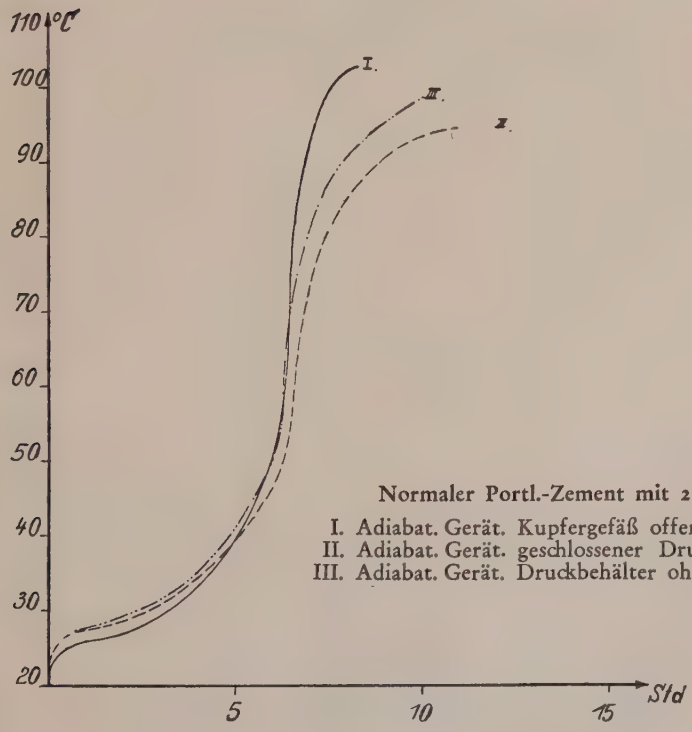
stigkeits-)Versuche wurde nachgewiesen, daß gegen die bisher übliche Methode der Ermittlung der Abbindezeiten nach Vicat insofern Bedenken zu äußern sind, als sie nicht für den in Frage stehenden Zement den Zeitpunkt angibt, bis zu welchem er in die Schalung eingebracht sein muß, um nicht Festigkeitsverminderung im Bauwerk zu verursachen. Die Erfahrungen über diese Tatsachen liegen zum Teil schon lange zurück. Es ist deshalb die Forderung zu erheben, die Fragen der Abbindeverhältnisse der Zemente durch umfangreiche Versuche von Grund auf zu klären und eventuell die Abbindeverhältnisse für die Zemente begrifflich anders festzulegen.

Anlage 1



Normaler Portl.-Zement mit 27% Wasser.
Adiabat. Gerät. Kupfergefäß offen.

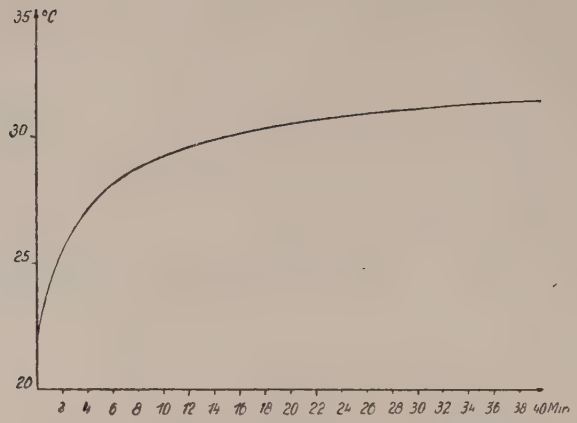
Anlage 2



Normaler Portl.-Zement mit 28% Wasser

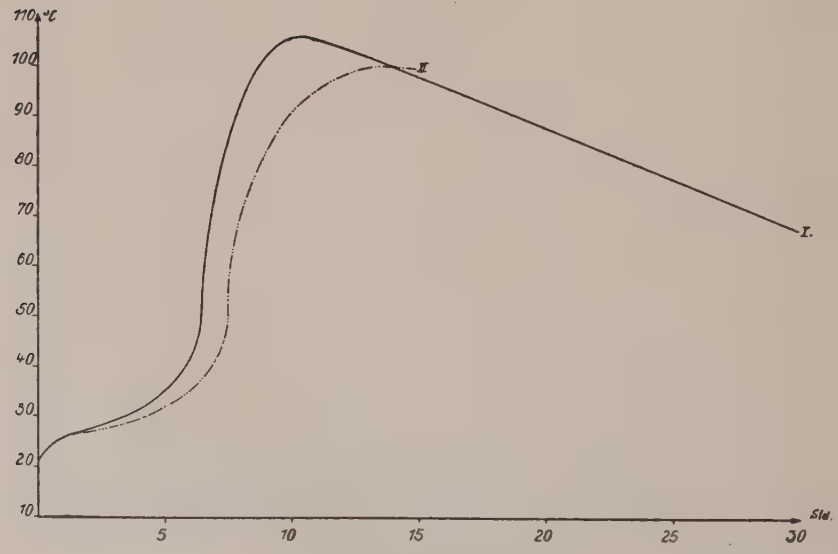
I. Adiabat. Gerät. Kupfergefäß offen.
II. Adiabat. Gerät. geschlossener Druckbehälter.
III. Adiabat. Gerät. Druckbehälter ohne Deckel.

Anlage 3



Normaler Portland-Zement mit 29,7% Wasser
schichtenweise in 1/2 l Thermosflasche gefüllt.

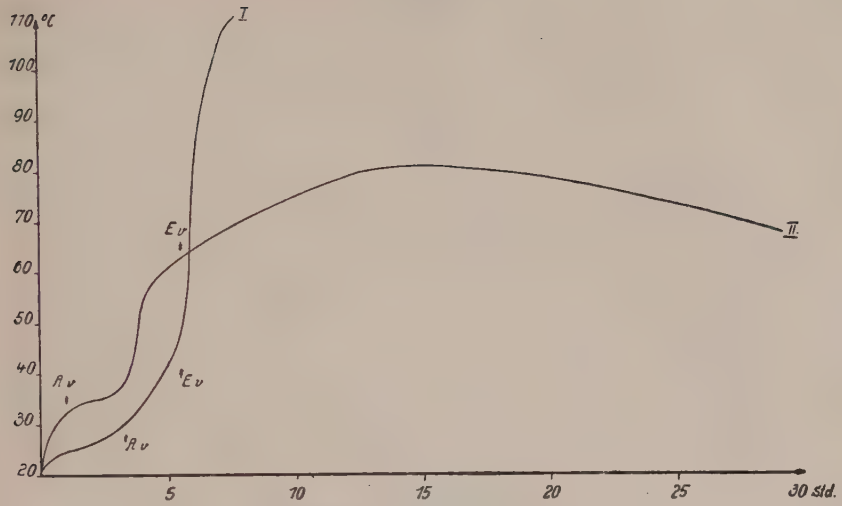
Anlage 4



Normaler Portland-Zement
in 1/2 l Thermosflasche

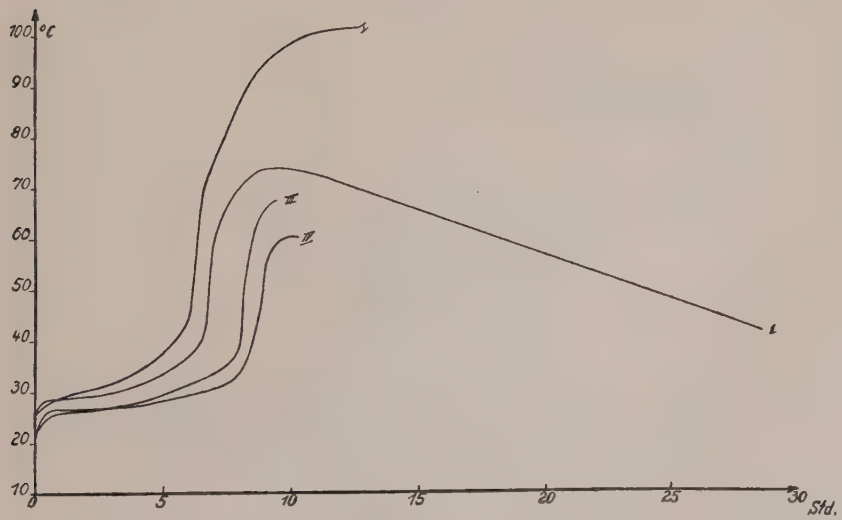
I. 24% Wasserzusatz.
II. 30% Wasserzusatz

Anlage 5



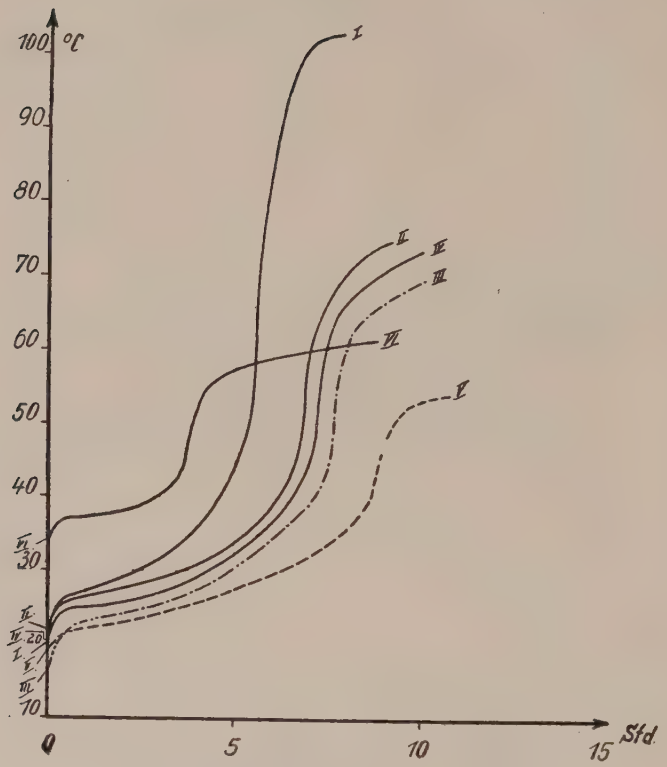
Normaler Portland-Zement
mit 27% Wasser in $^1/_2$ l Thermosflasche
I. frischer Zement, II. umgeschlagener Zement,
(A_v, E_v siehe Anlage 9).

Anlage 6



Normaler Portland-Zement mit 27% Wasser
I. $^1/_4$ l Thermosflasche im gleichtemp. Wasserbad,
II. Wärmekiste, III. Zinkkästchen in Glaswanne,
IV. Dasselbe wie III, nur noch schlechtere Isolation.

Anlage 7



Temp.-Kurven im Adiab. Gerät

Kupfergefäß offen

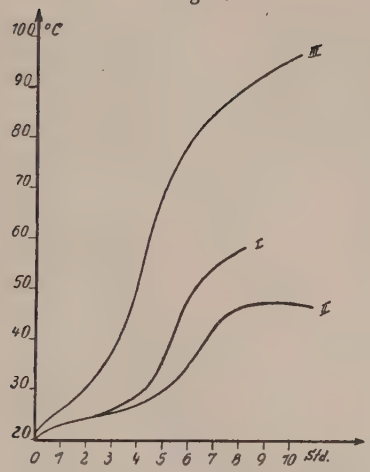
Hochw. Portland-Zement

I. Zement mit 30% Wasser,

II, III, IV. Zement: Normensand = 1 : 1 + 18% Wasser
(Versch. Anfangstemperaturen)

V, VI. Zement: Normensand = 1 : 2 + 15% Wasser
(Versch. Anfangstemperaturen).

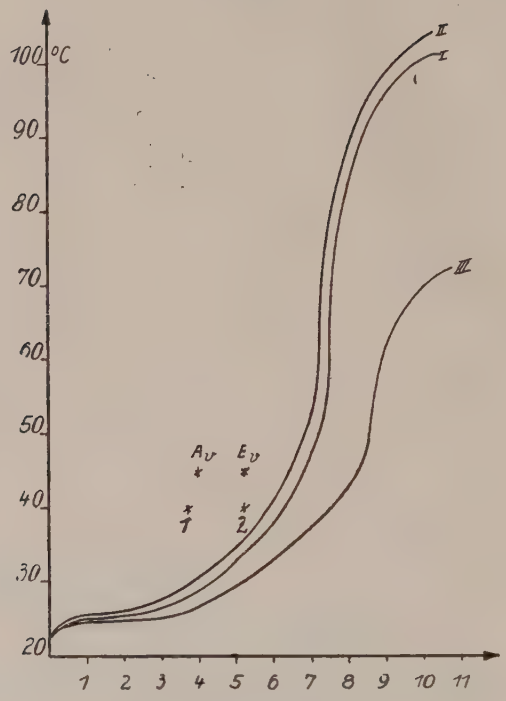
Anlage 8



Höchstwertiger Portland-Zement
mit Normensand 1 : 1
und 18% Wasser in adiabat. Gerät mit offenem Kupfergefäß

I. Normale Bedienung,
II. 5° unterkühlt,
III. 5° überhitzt.

Anlage 9



Normaler Portland-Zement
mit 30% Wasser

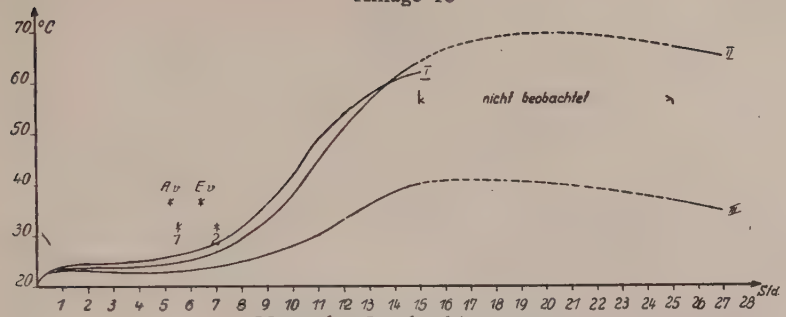
I. Adiabat. Gerät (Kupfergefäß offen),
II. $^1/_2$ l Thermosflasche,
III. Wärmekiste.

Abbindeverhältnisse:

A_v, E_v = Anfang und Ende nach Vicat,

Im Gerät { 1. Erstes Steckenbleiben der Nadel,
2. Nadel dringt nicht mehr ein.

Anlage 10

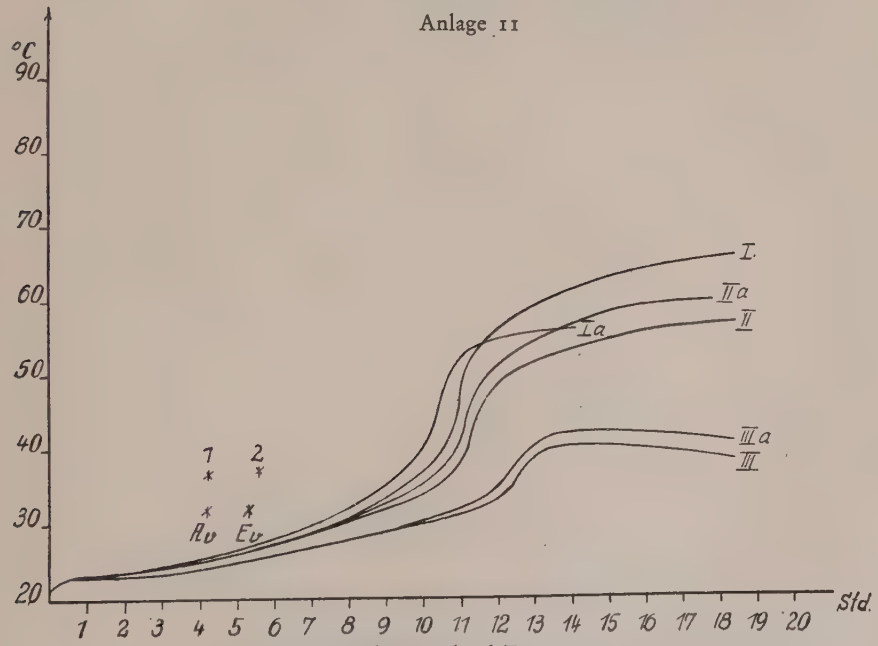


Normaler Portland-Zement

mit Normensand 1 : 1 (nach Gew.) gemischt, mit 18% Wasser

I. Adiabat. Gerät (Kupfergefäß offen),
II. $^1/_2$ l Thermosflasche, III. Wärmekiste,
A_v, E_v, 1, 2 siehe Anlage 9 (Zement von anderer Sorte als bei Anlage 9, 11 u. 12).

Anlage 11

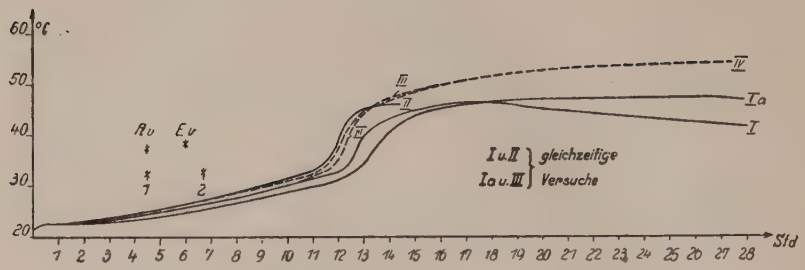


Normaler Portland-Zement

mit Normensand 1 : 2 (nach Gew.) mit 15% Wasser

I. Adiabat. Gerät (Kupfergefäß mit Deckel),
Ia. Adiabat. Gerät (Kupfergefäß ohne Deckel),
II, IIa $^1/_2$ l Thermosflasche, III, IIIa Wärmekiste.
Die Versuche „a" sind 7 Tage nach den anderen ausgeführt.
A_v, E_v, 1, 2 siehe Anlage 9.

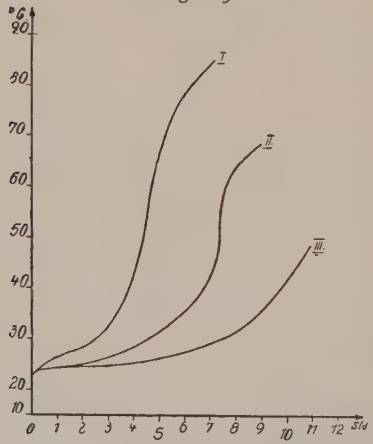
Anlage 12



Normaler Portland-Zement
mit Normensand 1 : 3 (nach Gewicht)

I, Ia $^1/_2$ l Thermosflasche,
II. Adiabat. Gerät (Kupfergefäß offen),
III. Adiabat. Gerät (Kupfergefäß mit Deckel),
IV. Adiabat. Gerät (Kupfergefäß geschlossen mit Zinkeinsatz),
A_v, E_v, 1, 2 siehe Anlage 9.

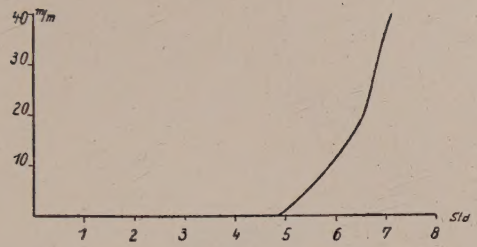
Anlage 13



Adiabat. Gerät (Kupfergefäß offen)

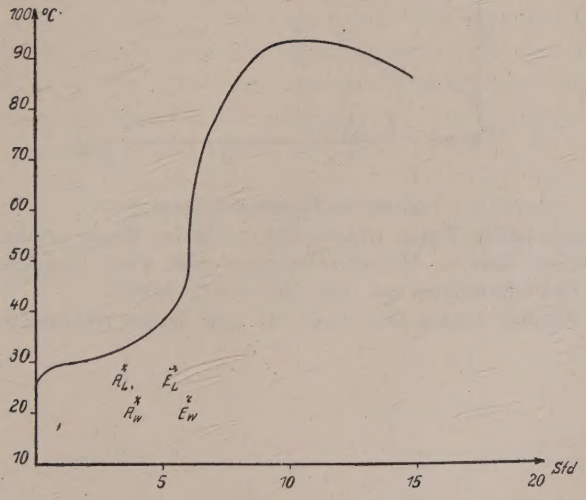
I. Höchstw. Zement: Normensand = 1 : 1 mit 18% Wasser,
II. Hochw. Zement: Normensand = 1 : 1 mit 18% Wasser,
III. Normaler Portland-Zement: Normensand = 1 : 1 mit 18% Wasser.

Anlage 14



Normengem. Vicat-Versuch
Eindringtiefe zeitlich aufgetragen
Norm. Portland-Zement mit 27% Wasser
(wie auf Anlage 10)

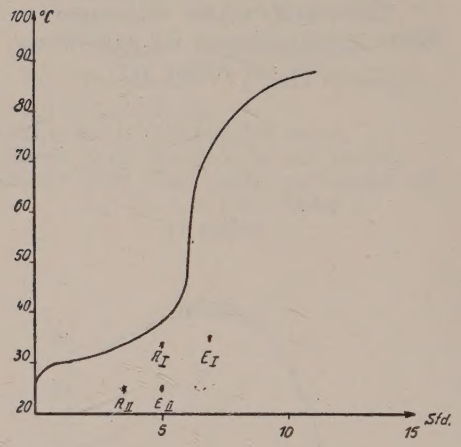
Anlage 15



Normaler Portland-Zement
mit 27% Wasser in $^1/_2$ l Thermosflasche

Normaler Nadelversuch: A_L, E_L = Abbinde-Anfang und -Ende bei Luftlagerung,
A_W, E_W = Abbinde-Anfang und -Ende bei Wasserlagerung.

Anlage 16



Normaler Portland-Zement

mit 30,6% Wasser schichtweise in Thermosflasche gefüllt.

am selben Zement Abbindeverhältnisse nach Vicat (Luftlagerung)

A_I, E_I = Abbinde-Anfang und -Ende bei 30,6% Wasser,

A_{II}, E_{II} = Abbinde-Anfang und -Ende bei 27% Wasser (Normensteife).

Lebenslauf.

Am 20. August 1910 wurde ich, Alois Walter Benedickt in Neumarkt/Schl. als Sohn des städt. Bauaufsehers Martin Benedickt geboren. In meiner Heimatstadt besuchte ich von Ostern 1916—1920 die Volksschule und von Ostern 1920—1929 das Reform-Realgymnasium, welches ich mit bestandener Reifeprüfung verließ. Nach anschließender halbjähriger praktischer Tätigkeit bezog ich mit WS. 1929/30 die Technische Hochschule Breslau, um das Bauingenieursstudium zu ergreifen. November 1931 bestand ich hier die Diplom-Vorprüfung und April 1934 die Diplomhauptprüfung. In der Zeit von Mai 1934 bis April 1936 war ich Assistent am Lehrstuhl für Eisenbeton- und Massivbrückenbau der Technischen Hochschule Breslau (Prof. Dr.-Ing. Berrer). Während meiner Assistententätigkeit habe ich die Versuche zu der vorliegenden Arbeit durchgeführt. Mit 1. Mai 1936 ging ich als Statiker zur Allgemeinen Baugesellschaft Lorenz & Co, Berlin-Wilmersdorf, wo ich bis Januar 1937 blieb. Seit 1. März 1937 bin ich als wissenschaftlicher Angestellter im Stadtamt für Tiefbau und Betriebe der Landeshauptstadt Dresden tätig.